UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola de Engenharia de São Carlos
Departamento de Engenharia de Transportes
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes

Luan Guilherme Staichak Carvalho

Calibração do modelo de desempenho de caminhões do Vissim

São Carlos
2018

Luan Guilherme Staichak Carvalho

Calibração do modelo de desempenho de caminhões do Vissim

Dissertação de Mestrado submetida à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de *Mestre em Ciências*, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes. Área de Concentração: Planejamento e Operação de Sistemas de Transportes

Orientador: Prof. Dr. José Reynaldo Setti

São Carlos

2018

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

C331c Carvalho, Luan Guilherme Staichak
 Calibração do modelo de desempenho de caminhões do
 Vissim / Luan Guilherme Staichak Carvalho; orientador
 José Reynaldo Anselmo Setti. São Carlos, 2018.

 Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação
 em Engenharia de Transportes e Área de Concentração em
 Planejamento e Operação de Sistemas de Transporte --
 Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de
 São Paulo, 2018.

 1. Simulação de Tráfego. 2. Caminhões. 3. Rodovia.
 4. Perfis de Velocidade. 5. Algoritmo Genético. 6.
 Equivalentes Veiculares. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **LUAN GUILHERME STAICHAK CARVALHO**.

Título da dissertação: "Calibração do modelo de desempenho de caminhões do Vissim".

Data da defesa: 17/12/2018.

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Titular **Jose Reynaldo Anselmo Setti**
(Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovado

Prof. Dr. **Werner Kraus Júnior**
(Universidade Federal de Santa Catarina/UFSC)

Aprovado

Prof. Dr. **Cassiano Augusto Isler**
(Escola Politécnica/EP-USP)

Aprovado

Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes:
Prof^a. Associada **Ana Paula Camargo Larocca**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Luís Fernando Costa Alberto**

Para Azathoth, sonhador de sonhadores...

Do you remember the taste of strawberries?
Sam, The Lord of the Rings: The Return of the King (filme).

Ph'nglui mglw'nafh Cthulhu R'lyeh wgah'nagl fhtagn
H. P. Lovecraft, The Call of Cthulhu.

Agradecimentos

Agradeço, primeiramente, àqueles que me forneceram apoio crucial, emocional e/ou financeiro, à execução desta pesquisa. Aos meus pais, Jorge e Maria Helena, pelos seus esforços incomensuráveis, sem os quais não seria possível concluir este trabalho. “A ciência no Brasil é bancada pelos pais”, *alas!* Agradeço-lhes também por sempre acreditar em mim. À Alexia, por me acompanhar durante toda essa jornada, e por zelar pela minha humanidade. À minha avó, Daniela, pelo carinho e prestatividade.

Complemento o conjunto de pessoas indispensáveis a este trabalho agradecendo ao Professor José Reynaldo Setti, pela excelente orientação em cada etapa e cada minúcia desta pesquisa, possibilitando melhorar (e muito!) os produtos deste trabalho. Aprendi muito, como profissional e como pessoa, devido à sua experiência, exigência e dedicação.

Prossigo, reconhecendo aqueles que me auxiliaram em diversas etapas deste trabalho. Às concessionárias Autovias e Centrovias, por todo o apoio prestado durante a coleta de dados. Aos colegas do grupo de pesquisa: Piva, Juliana, Gabriela e Renan, por incontáveis sugestões, ensinamentos, pitacos, mãozinhas, e demais contribuições. Ao Diego, Aurenice, Sergio, Venâncio e Guilherme, pelos ensinamentos e apoio em todas as atividades envolvendo os equipamentos GPS e os dados com eles obtidos. À CAPES, por uma bolsa de estudos. Aos professores e funcionários do Departamento de Transportes da EESC-USP, por todo conhecimento e auxílio.

Por fim, a todos os colegas do departamento, pela amizade e por todos os ensinamentos, acadêmicos ou não. Ser um mestrando é, apesar de tudo, muito solitário. Todavia, nossas inúmeras conversas foram como as garrafas da música *Message in a Bottle*: infindáveis mensagens de náugrafos, que me fizeram perceber que eu não era o único a estar só. Agradeço-lhes, pois vocês tornaram essa jornada mais agradável.

Resumo

Carvalho, L. G. S. **Calibração do modelo de desempenho de caminhões do Vissim**. 121 p. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2018.

Simuladores de tráfego são ferramentas importantes para planejamento e operação do tráfego, pois permitem avaliar cenários de maneira segura e com baixo custo. Porém, a configuração original desses programas é ajustada para replicar as condições do tráfego observado no país de origem do simulador. Em rodovias, o modelo de desempenho de caminhões tem grande influência no comportamento da corrente de tráfego. No Vissim, todavia, esse modelo simula veículos com melhor desempenho, se comparados aos caminhões brasileiros. Apresenta-se neste trabalho a calibração das funções de aceleração para caminhões do Vissim, utilizando a diferença entre perfis de velocidade simulados e reais como medidas de ajuste. Os perfis de velocidade foram criados a partir de dados de GPS para caminhões que trafegaram ao longo de uma rodovia de pista dupla em relevo ondulado, sob baixo fluxo de tráfego. O ruído na velocidade presente nesses dados foi atenuado por meio de um filtro gaussiano. Determinou-se então o perfil longitudinal da rodovia através dos pontos coletados pelo GPS, de modo a ser possível comparar as velocidades reais e simuladas em pontos preestabelecidos ao longo do trecho. A calibração foi automatizada por meio de um algoritmo genético. Todas as replicações da calibração resultaram em configurações para as funções de aceleração capazes de gerar perfis de velocidade simulados mais próximos dos reais se comparadas à configuração original do simulador. Por fim, um estudo de caso foi usado para demonstrar a necessidade de recalibração do simulador, através da avaliação do impacto causado pela calibração do simulador nos equivalentes veiculares obtidos com dados simulados.

Palavras-chave: Simulação de Tráfego. Caminhões. Rodovia. Perfis de Velocidade. Algoritmo Genético. Equivalentes Veiculares.

Abstract

Carvalho, L. G. S. **Calibration of Vissim's truck acceleration model**. 121 p. Master Thesis – São Carlos School of Engineering, University of São Paulo, 2018.

Traffic simulators are important tools for traffic planning and operation, as they can be used to perform safe, low-cost scenario evaluation. However, these software's default configuration is adjusted to replicate the traffic conditions found in the simulators' country of origin. The truck performance model heavily impacts traffic behavior in simulations of freeway segments. The default values for Vissim's performance model are adjusted for trucks with lower mass/power ratios than typical Brazilian trucks. The objective of the research reported here was to recalibrate Vissim's truck acceleration functions using the difference between real and simulated truck speed profiles as goodness-of-fit measures. The speed profiles were created using GPS data obtained from trucks travelling over a four-lane freeway situated on rolling terrain, under low traffic flow. Speed noise was removed from GPS data using a Gaussian filter. The longitudinal profile of the freeway was determined using GPS data, to allow for the comparison of observed and simulated speeds at fixed points along the segment. The calibration procedure was automated and based on a genetic algorithm. Every calibration run provided a configuration for the acceleration functions that reduced the difference between simulated and real speed profiles, if compared to the simulator's default configuration. The effects of the truck performance model recalibration were demonstrated by means of a case study focusing on the estimation of passenger-car equivalents for Brazilian trucks travelling on freeways.

Keywords: Traffic Simulation. Trucks. Freeway. Speed Profiles. Genetic Algorithm. Passenger-Car Equivalents.

Sumário

1	Introdução	19
1.1	Justificativa	19
1.2	Hipótese e objetivos específicos	20
1.3	Estrutura do texto	20
2	Revisão da literatura	23
2.1	Funções de aceleração do Vissim	23
2.2	Avaliação do ajuste das funções de aceleração	25
2.3	Métodos para busca de soluções ótimas	26
2.3.1	Algoritmos meta-heurísticos	26
2.4	Considerações finais	27
3	Perfis de velocidade	29
3.1	Introdução	29
3.2	Métodos de obtenção de perfis de velocidade	31
3.3	Redução do ruído aleatório dos dados coletados por GPS	31
3.4	Método proposto	32
3.4.1	Coleta dos dados	33
3.4.2	Tratamento dos dados de entrada	33

3.4.3	Estaqueamento e padronização do trecho de referência	34
3.4.4	Identificação do conjunto de observações para cada regressão	36
3.4.5	Obtenção de velocidade por estaca	38
3.5	Aplicação do método proposto	40
3.6	Considerações finais	41
4	Calibração do modelo de desempenho de caminhões	43
4.1	Introdução	43
4.2	Simuladores de tráfego e a necessidade de calibrá-los	44
4.3	Abordagem utilizada	45
4.3.1	Preparação do simulador para calibração	46
4.4	Método proposto	47
4.4.1	Dados de entrada	47
4.4.2	Função <i>fitness</i>	48
4.4.3	Criação das redes para simulação	49
4.4.4	Implementação do Algoritmo Genético	50
4.5	Análise dos resultados da calibração	52
4.6	Análise dos resultados da validação	54
4.7	Considerações finais	56
5	Equivalentes veiculares para caminhões em trechos planos	59
5.1	Equivalentes veiculares através do método de Huber	59
5.2	Rede de simulação	61
5.2.1	Volumes de tráfego	62
5.2.2	Dados de entrada para o simulador calibrado	62
5.3	Extração e tratamento dos dados	64
5.4	Resultados	65
5.5	Considerações finais	67
6	Equivalentes veiculares para caminhões em aclives	69
6.1	Rede de simulação	69
6.2	Extração, tratamento dos dados e cálculo do equivalente veicular	70

6.3	Resultados	72
6.4	Considerações finais	75
7	Considerações finais e recomendações	77
7.1	Conclusões	78
7.2	Recomendações	79
	Referências	81
	Apêndices	87
APÊNDICE A	Perfis de velocidade suavizados e simulados	89
APÊNDICE B	Tabelas dos equivalentes veiculares para caminhões utilizando o simulador calibrado	95
APÊNDICE C	Tabelas dos equivalentes veiculares para caminhões utilizando o simulador nas configurações originais	109

Introdução

1

Simuladores de tráfego são ferramentas importantes na gestão do tráfego urbano e rodoviário, pois permitem avaliar cenários reais e hipotéticos de maneira segura, com baixo custo e num intervalo de tempo menor se comparado ao necessário para obtenção de dados reais. Neste trabalho, abordam-se os esforços para calibração do modelo de desempenho dos caminhões do microssimulador de tráfego Vissim. Apresentam-se também os resultados da calibração desse simulador por meio da obtenção de equivalentes veiculares para caminhões trafegando em rodovias de pista dupla.

1.1 Justificativa

A eficiência do uso de um simulador no planejamento e operação do tráfego depende da capacidade do simulador replicar as condições de tráfego reais (HOURDAKIS; MICHALOPOULOS; KOTTOMMANNIL, 2003). Todavia, o comportamento do tráfego pode variar de uma região para outra de acordo com as particularidades dos veículos e motoristas presentes em cada local. Portanto, a calibração dos diversos modelos de simulação é uma etapa importante para se aproximar os dados simulados às condições do local de estudo. Porém, o uso corriqueiro dos simuladores se faz com pouco ou nenhum ajuste de seus modelos, pois a calibração exige esforço computacional considerável e os dados necessários são de difícil obtenção.

O microssimulador de tráfego Vissim foi escolhido para este trabalho pois a sua calibração para rodovias brasileiras é um esforço em andamento do grupo de pesquisa do Prof. Dr. José Reynaldo Setti, sendo que a calibração dos modelos de comportamento dos motoristas já foi concluída (BETHONICO; PIVA; SETTI, 2016). Porém, não há calibração do modelo de desempenho desse simulador para reprodução das características do deslocamento individual dos ca-

minhões brasileiros, que possuem pior desempenho se comparados aos caminhões europeus, para os quais o Vissim foi originalmente ajustado. Logo, calibrar o modelo de desempenho do Vissim é uma etapa valiosa para simular com fidelidade correntes de tráfego em rodovias de pista dupla no Brasil.

1.2 Hipótese e objetivos específicos

Neste trabalho, busca-se testar a hipótese de que calibrar o modelo de desempenho de caminhões do Vissim resulta em menor erro entre perfis de velocidade reais e simulados se comparado aos resultados obtidos com as configurações originais do modelo. Para avaliar essa hipótese, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

1. Obter perfis de velocidade para uma amostra representativa de caminhões deslocando-se ao longo de uma rodovia com relevo suficientemente variado para que os caminhões atinjam a velocidade de equilíbrio nos aclives. A coleta de dados deve ser feita sob baixo volume de tráfego, para que a interação com outros veículos não afete a velocidade dos caminhões observados. A amostra de veículos deve ser representativa da gama dos caminhões típicos brasileiros, em termos de configuração e da razão massa/potência;
2. Calibrar o modelo de desempenho de caminhões do Vissim, usando como medida de qualidade do ajuste do modelo a diferença entre a velocidade real e a velocidade simulada dos caminhões da mesma classe veicular da amostra. A calibração do modelo é realizada automaticamente, através de um programa que usa um algoritmo genético para obter a melhor configuração do modelo de desempenho veicular;
3. Elaborar um estudo de caso, em que se avalia como a calibração do simulador influencia os equivalentes veiculares calculados a partir de dados simulados. Simulam-se correntes de tráfego em pista dupla em diversos cenários, cada qual uma combinação única das seguintes variáveis: porcentagem de caminhões na corrente, comprimentos de aclive, e greide. Os resultados das simulações são utilizados para calcular o equivalente veicular para caminhões em cada um desses cenários, e por fim os equivalentes obtidos com a configuração calibrada são comparados aos equivalentes provenientes da configuração original do simulador.

1.3 Estrutura do texto

Este documento foi dividido em sete capítulos. Este capítulo consiste no panorama geral dos simuladores, justificativa, meta e objetivos da pesquisa. No Capítulo 2 é apresentada uma breve revisão bibliográfica referente às características fundamentais do modelo de desempenho do Vissim; e às técnicas para calibração de simuladores.

No Capítulo 3 descreve-se a caracterização dos caminhões que trafegam em uma rodovia do estado de São Paulo, correspondendo ao objetivo específico 1. No Capítulo 4 apresenta-se a calibração do modelo de desempenho de caminhões do Vissim, que consiste no objetivo específico 2. O Capítulo 5 contém a caracterização da parcela de tráfego referente aos caminhões, bem como a descrição do experimento para obtenção de equivalentes veiculares para caminhões em trechos planos, compreendendo parte do objetivo específico 3. O Capítulo 6 complementa o capítulo anterior por meio da avaliação dos equivalentes veiculares obtidos em aclives, finalizando os objetivos propostos para este trabalho. Por fim, discute-se no Capítulo 7 as conclusões obtidas nesta pesquisa, sugerindo-se também algumas recomendações para futuros trabalhos.

Todas as figuras e tabelas deste texto, com exceção daquelas cuja autoria é explicitamente indicada, foram elaboradas pelo autor.

Revisão da literatura

2

Neste capítulo, apresenta-se uma breve revisão da literatura que embasa duas decisões principais deste trabalho: qual tipo de dado se utilizar para calibração do modelo de desempenho do Vissim; e qual tipo de algoritmo se utilizar para automatizar a busca pelos melhores ajustes do modelo de desempenho.

2.1 Funções de aceleração do Vissim

No Vissim, os veículos podem modificar suas velocidades de acordo com funções de aceleração e desaceleração máximas e desejadas. Elas representam a região de valores de aceleração (ou desaceleração) que um veículo pode utilizar para modificar sua velocidade. Essas “funções” são configuradas por meio de uma tabela que relaciona os valores máximo, mínimo e mediano de aceleração disponíveis de acordo com a velocidade instantânea do veículo (PTV AG, 2016). Uma representação gráfica dessas funções pode ser exemplificada através da Figura 2.1, que contém a configuração original do simulador para as funções de aceleração máxima e desejada. Em ambos os gráficos, os pontos de aceleração são indicados em relação à velocidade instantânea do veículo a cada 10 km/h. Cada função apresenta três curvas, indicando os valores de aceleração utilizáveis por caminhões que apresentam relação potência/massa entre 7 e 30 kW/t (PTV AG, 2016).

Para definir os valores de aceleração versus velocidade disponíveis para um caminhão simulado, o Vissim calcula a razão potência/massa desse veículo no instante em que ele é gerado. O valor obtido é então comparado aos limites superior e inferior de potência/massa estabelecidos para a simulação. Caso a potência/massa do caminhão esteja fora dos limites, o valor calculado é substituído pelo limite mais próximo (nas configurações da Figura 2.1, um

Figura 2.1: Configuração padrão do Vissim 9 para as funções de aceleração máxima e de aceleração desejada dos caminhões (CARVALHO; SETTI, 2018).

caminhão com 4 kW/t terá sua potência/massa arredondada para 7 kW/t, visto que esse é o limite mais próximo do valor calculado). Nessa situação, o veículo terá os valores de aceleração máxima e desejada iguais aos das respectivas curvas-limite referentes a seu novo valor de potência/massa.

Caso a potência/massa do caminhão se encontre dentro dos limites, seus valores de aceleração serão obtidos por meio da interpolação linear entre as curvas-limite, utilizando-se a potência/massa do caminhão como medida de distância para interpolação. Na Figura 2.1, as curvas “medianas” correspondem às acelerações interpoladas para um caminhão com 18,5 kW/t, enquanto que as curvas-limite são as acelerações utilizadas por caminhões fora do intervalo de potência/massa estipulado.

Além das diferenças de massa e potência entre caminhões, o Vissim também varia a aceleração possível com base na declividade das rampas. Sempre que o veículo se encontra em trechos inclinados, sua curva de aceleração máxima é deslocada verticalmente, modificando cada ponto por meio da relação $a_{v,G} = (a_v - 0,1G)$, em que a_v é a aceleração (em m/s^2) correspondente à velocidade v em trecho plano; e $a_{v,G}$ é a aceleração (em m/s^2) que pode ser obtida à velocidade v em uma rampa de declividade G (em $m/100\ m$).

Outro aspecto importante do simulador é que todos os veículos recebem um valor de velocidade desejada quando são criados. A velocidade desejada determina a máxima velocidade que o veículo atingirá, mesmo que suas curvas interpoladas de aceleração permitam-lhe atingir velocidades maiores.

As propriedades das funções de aceleração afetam duas decisões referentes à calibração: como avaliar o ajuste das funções aos dados reais; e como conduzir a busca pelos parâmetros dessas funções que resultem em melhor ajuste entre dados reais e simulados. Uma discussão sobre essas decisões é exposta a seguir.

2.2 Avaliação do ajuste das funções de aceleração

Uma das características básicas a se decidir acerca da avaliação do ajuste das funções de calibração é a opção entre dados agregados ou desagregados. As funções de aceleração são diretamente responsáveis pelas alterações na velocidade veicular a nível microscópico. Ainda, na ausência de interação entre veículos, as funções se tornam os únicos agentes na alteração da velocidade dos veículos. Assim, dados desagregados, isto é, referentes a cada veículo, e não agregados para a corrente de tráfego, se tornam ideais para a calibração estudada neste trabalho, apesar desse tipo de medida ser difícil de se coletar (BALAKRISHNA et al., 2007).

A função de aceleração desejada indica qual valor de aceleração o veículo “prefere” utilizar de acordo com sua velocidade instantânea, com o intuito de se atingir uma velocidade de desejo. Todavia, essa aceleração pode ser limitada pela função de aceleração máxima, cujos valores se modificam de acordo com a declividade do local em que se encontra o veículo. Em rampas ascendentes, a aceleração máxima diminui de forma proporcional à intensidade do aclive. Dessa forma, identificam-se algumas das características desejáveis dos dados a se coletar e simular: (i) são necessárias informações referentes ao deslocamento veicular em aclives; e (ii) é necessário utilizar cenários em que os motoristas conduzem seus veículos da maneira que desejam, isto é, sem que sua velocidade seja afetada pela interação com outros veículos.

A primeira exigência pode ser atendida por meio da obtenção de dados em rodovias de relevo ondulado, comuns em território nacional, ao passo que a segunda pode ser obtida em condições de tráfego com fluxo baixo. Para coletar dados desagregados nessas condições, abordagens apresentadas em outras pesquisas foram consideradas. Câmeras de vídeo para registro de trajetórias veiculares em interseções já foram utilizadas para calibrar parâmetros de *car-following* e funções de aceleração do Vissim com o intuito de se calcular a emissão de poluentes (JIE et al., 2013). Todavia, seriam necessários diversos pontos de observação para se capturar o deslocamento para um trecho rodoviário longo.

Em contrapartida, modelos de desempenho para outros simuladores já foram calibrados utilizando dados de velocidade obtidos com GPS embarcado (CUNHA; BESSA; SETTI, 2009), simulando rampas longas precedidas por regiões planas. Ainda, a calibração das funções de aceleração do Vissim para carros de passeio em trechos urbanos já foi realizada usando dados de GPS (LI; ZUYLEN; XU, 2015). Dessa forma, optou-se por utilizar dados de velocidade oriundos de GPS embarcado em caminhões que trafegam em rodovias de relevo ondulado com baixo tráfego, com o intuito de se ajustar o comportamento veicular simulado ao longo de sucessões de aclives e declives que são recorrentes nas rodovias nacionais. Uma vez que as diretrizes para a avaliação do ajuste das funções foi estabelecida, prossegue-se com uma discussão sobre qual algoritmo utilizar para automatização do procedimento de busca das melhores configurações para as funções estudadas.

2.3 Métodos para busca de soluções ótimas

Na configuração padrão do Vissim, pode-se verificar através da Figura 2.1 que, a cada incremento de 10 km/h na velocidade, no eixo das abscissas, há três valores de aceleração máxima e três valores de aceleração desejada. Essa configuração implica na existência de 42 pares de valores [*velocidade*, *aceleração*] entre as velocidades de 0 a 130 km/h para cada função, ou 84 pontos no total, sendo que todos eles podem ser ajustados para que o modelo de desempenho gere perfis de velocidade simulados mais próximos dos observados para veículos brasileiros. Dessa forma, tem-se que cada combinação válida desses 84 pontos representa uma solução possível para a calibração das funções. Logo, o campo de soluções possíveis, isto é, o conjunto de todas as configurações válidas para essas funções, é extenso.

Em diversos problemas de otimização, buscas exaustivas (ou de força bruta), que significam testar todas as soluções possíveis para o problema e escolher a configuração que apresentar melhor desempenho, não são soluções práticas devido ao espaço de busca ser muito grande (BURKE et al., 2003, p. 459). Consequentemente, faz-se necessário utilizar métodos de busca mais sofisticados.

2.3.1 Algoritmos meta-heurísticos

Algoritmos meta-heurísticos são métodos de busca que objetivam conciliar tempo de processamento com soluções suficientemente ajustadas para problemas de otimização complexos, cujas propriedades do campo de soluções inviabilizam testar todas as alternativas possíveis para o problema (SALCEDO-SANZ, 2016). Esses métodos de busca utilizam conceitos de diferentes áreas de conhecimento (evolução biológica, sistemas neurais, etc.) para executar um processo de busca iterativo que usa estratégias de aprendizado para estruturar informações e encontrar soluções quase-ótimas (OSMAN; KELLY, 1996).

Meta-heurísticas são utilizadas frequentemente em calibrações de simuladores de tráfego, embora existam poucos trabalhos focados na comparação do desempenho entre diferentes tipos desses algoritmos. Nesses, as conclusões são similares: embora seja possível identificar diferenças de desempenho entre diferentes algoritmos para um mesmo caso de estudo (LIDBE; HAINEN; JONES, 2017), é inviável apontar uma meta-heurística superior às demais, visto que o tempo de convergência e qualidade das soluções obtidas depende das características do caso de estudo, como por exemplo o modelo a ser calibrado, os tipos e qualidade dos dados utilizados, a medida utilizada para avaliação do ajuste, entre outros (CIUFFO; PUNZO, 2014).

O algoritmo genético é a meta-heurística mais utilizada para calibração de simuladores de tráfego. Esse método de busca utiliza conceitos de seleção natural e genética para orientar o processo de busca (KUMAR et al., 2010). O algoritmo genético já foi empregado para ajuste de dados de demanda de tráfego (TETTAMANTI et al., 2015), na calibração dos modelos de *car-*

following e *lane change* (KIM; RILETT, 2001; BETHONICO; PIVA; SETTI, 2016), de desempenho (CUNHA; BESSA; SETTI, 2009) e para ajuste de rotas dinâmicas (MA; ABDULHAI, 2001), mostrando-se capaz de localizar parâmetros ajustados para esses modelos usando diferentes tipos de dados e medidas de desempenho. Portanto, é esperado que essa técnica possa também ser empregada para calibrar o modelo de desempenho do Vissim usando dados desagregados.

2.4 Considerações finais

A calibração das funções de aceleração apresenta um extenso campo de soluções possíveis. Na calibração de simuladores, esse problema se agrava pelo alto tempo de processamento, pois avaliar cada solução compreende executar uma simulação utilizando a configuração em avaliação, extrair os dados simulados e calcular o valor da medida de ajuste.

Para buscar soluções ótimas em espaços de busca complexos é apropriado utilizar um algoritmo de busca meta-heurístico em detrimento de algoritmos de busca exaustiva, visto que os meta-heurísticos são capazes de direcionar a busca para regiões do campo de soluções com ocorrência de ótimos locais, diminuindo o tempo necessário para concluir a busca e aumentando a chance de se localizar as melhores soluções disponíveis (ótimo global). Dentre os diversos algoritmos meta-heurísticos existentes, optou-se por utilizar o algoritmo genético, visto que há literatura extensa envolvendo o uso dessa técnica para calibração de diversos simuladores de tráfego.

Verificou-se que os dados coletados com GPS para caminhões em movimento são uma opção viável para calibração do modelo de desempenho do Vissim, visto que, por serem dados desagregados, permitem verificar nuances no comportamento veicular individual que não seriam notáveis ao se utilizar dados agregados de tráfego. O processo para coleta, tratamento e transformação desses dados em perfis de velocidade são abordados no Capítulo 3, a seguir.

Perfis de velocidade

3

Perfis de velocidade descrevem o deslocamento veicular ao longo de um trecho rodoviário, representando graficamente a velocidade em pontos relevantes do percurso. Neste trabalho, os perfis são utilizados para calibrar o simulador de tráfego Vissim, fornecendo dois conjuntos de dados: (i) o perfil longitudinal da rodovia de estudo, para que a mesma possa ser inserida no simulador; e (ii) as velocidades de caminhões ao longo do trecho estudado, para comparação entre os veículos reais e simulados. Este capítulo apresenta um método para obter perfis de velocidade em que os valores são agrupados em pontos equidistantes ao longo de um segmento rodoviário. Uma parte expressiva desta abordagem foi apresentada em Carvalho e Setti (2017), portanto diversos trechos estão aqui reproduzidos integralmente. Ao final, apresenta-se uma coleta e processamento de dados realizados de acordo com o método proposto.

3.1 Introdução

Perfis de velocidade veicular são amplamente utilizados na Engenharia de Transportes: no projeto e na operação de rodovias, na simulação de correntes de tráfego, etc. A determinação do comprimento crítico de rampas no projeto de faixas adicionais é uma das aplicações mais conhecidas de perfis de velocidade (AASHTO, 2001; MELO; SETTI, 2003; ANDRADE; SETTI, 2010). A diversidade de aplicações exige que tais informações sejam tratadas em diferentes níveis de complexidade e agregação. Exemplos de tratamentos de velocidade incluem Quiroga e Bullock (1998), que estudaram tempos de viagem em segmentos de rodovia estimando velocidades a partir de observações no começo e no fim do trecho; Cunha, Bessa e Setti (2009), que utilizaram velocidades de caminhões em rampas para calibrar modelos de desempenho veicular em um simulador microscópico de tráfego; Andrade e Setti (2010), que propõem diretrizes para a implantação de faixas adicionais em aclives de rodovias de pista dupla; e Melo e Setti (2003), que

elaboraram curvas de desempenho de caminhões para projeto de faixas adicionais de subida em rodovias de pista simples.

O uso de equipamentos de GPS embarcados em veículos para registro direto ou indireto de velocidade é prática comum desde o fim da década de 1990 (QUIROGA; BULLOCK, 1998; DONNELL et al., 2001; LI; MCDONALD, 2002), o que implicou na criação de diversos métodos para processamento de tais informações. Em geral, tais técnicas incluem o uso de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), complementados por outros dados (por ex., volume veicular horário, velocidade média da corrente, entre outros), para aprimorar e facilitar o tratamento dos dados.

A velocidade veicular em rodovias com baixo volume de tráfego é, fundamentalmente, função das características do veículo e da geometria da via, já que há baixa interação entre veículos. Dispositivos GPS embarcados que determinam a posição do veículo com frequência de 1 Hz ou mais altas são particularmente eficazes para obter os dados de velocidade e distância para a elaboração dos perfis de velocidade nessas rodovias. Porém, o uso de GPS implica numa etapa prévia de filtragem de erros aleatórios e ajuste dos dados brutos (JUN; GUENSLER; OGLE, 2006).

São dois os problemas associados ao uso de GPS embarcado: (i) a correção de medidas inconsistentes; e (ii) a interpolação da velocidade, já que raramente as observações do GPS são feitas nos pontos desejados (por ex., a cada 100 m). Para resolver o primeiro problema é necessário filtrar os dados para eliminação do ruído aleatório do GPS (JUN; GUENSLER; OGLE, 2006). Para o segundo problema, é necessário estimar a velocidade do veículo no instante em que ele passa pelos pontos desejados (estacas), com base nas observações feitas antes e depois da passagem pela estaca. Esse problema pode ser resolvido por modelos ajustados através de mínimos quadrados parciais (JUN; GUENSLER; OGLE, 2006), ajustando-se polinômios através de regressão linear com pequenos conjuntos de observações antes e depois da estaca, já que a velocidade real não varia bruscamente. De fato, como se deseja conhecer a velocidade a intervalos discretos ao longo do trecho ou ao longo do tempo, o método de mínimos quadrados parciais proposto por Jun, Guensler e Ogle (2006) pode ser simplificado; ao dispensar o ajuste de uma curva única e contínua, é possível reduzir o modelo a regressões isoladas e simples.

Assim sendo, o objetivo deste capítulo é apresentar um método para obter perfis de velocidade de caminhões ao longo de trechos de rodovias com dados coletados por GPS embarcado, utilizando um filtro gaussiano para eliminação do erro aleatório do GPS e regressões lineares para interpolação das velocidades. Para tal, apresenta-se uma breve discussão sobre métodos de obtenção de perfis de velocidade, seguida de uma descrição do filtro gaussiano junto a uma discussão sobre a largura do janelamento a se adotar para o filtro. Apresenta-se então o método utilizado e os resultados obtidos.

3.2 Métodos de obtenção de perfis de velocidade

Um perfil de velocidade mostra a variação da velocidade de um veículo ao longo de um trecho de via. Para sua elaboração, é necessário coletar a velocidade em pontos fixos ao longo do trecho ou a intervalos fixos ao longo do percurso. No primeiro caso, pode-se usar videocâmeras e espelhos posicionados ao longo do trecho (ARCHILLA; CIEZA, 1996) ou registrar a velocidade de um carro que segue o caminhão, em pontos previamente marcados no acostamento (BESTER, 2000; DEMARCHI; MELO; SETTI, 2001). No segundo caso, as medidas de velocidade são feitas usando-se um dispositivo GPS, que pode ser instalado no próprio caminhão ou num veículo *probe* (QUIROGA; BULLOCK, 1998; RAKHA et al., 2001; LI; MCDONALD, 2002; JUN; GUENSLER; OGLE, 2006; CUNHA; BESSA; SETTI, 2009). Para ambos os casos, é possível utilizar diferentes combinações entre comprimentos de trecho e estados de movimento. Em um estudo em particular (RAKHA et al., 2001), o caminhão partia do repouso até alcançar a velocidade máxima, sob diversas condições de carregamento. Em outros estudos, os veículos usados foram automóveis (QUIROGA; BULLOCK, 1998; LI; MCDONALD, 2002; JUN; GUENSLER; OGLE, 2006) ou caminhões (ARCHILLA; CIEZA, 1996; BESTER, 2000; DEMARCHI; MELO; SETTI, 2001; CUNHA; BESSA; SETTI, 2009) que viajam por trechos mais longos.

Diversas maneiras de se obter perfis de velocidade foram desenvolvidas a partir de dados de GPS. Uma forma de se estimar a velocidade em um dado ponto da trajetória é através da média ou mediana de observações próximas (QUIROGA; BULLOCK, 1998). Outra maneira é através de modelos de regressão, como proposto por Donnell et al. (2001). Esses modelos utilizaram dados coletados em campo em conjunto com dados simulados.

Além dos dados simulados, outras informações auxiliares podem ser embutidas nos modelos estimados. Li e McDonald (2002) elaboraram um método para estimar tempo de viagem em tempo real para um trecho de rodovia, utilizando dados coletados com GPS em um único veículo embarcado e relacionando-os com um conjunto de dados obtidos com sensores instalados no local. Câmeras de vídeo e radares também podem ser combinados às observações de GPS para calibração de modelos (YANG et al., 2016).

3.3 Redução do ruído aleatório dos dados coletados por GPS

A coleta de dados de posição de objetos em movimento é sujeita à ocorrência de erros aleatórios de GPS, como demonstrado na Figura 3.1. De modo a atenuar o impacto desse fenômeno, faz-se necessário o uso de técnicas de suavização dos dados de velocidade, como filtros gaussianos, mínimos quadrados parciais, filtros de Kalman, entre outros (JUN; GUENSLER; OGLE, 2006). O filtro gaussiano, além de simples e prático, satisfaz plenamente a necessidade de se filtrar os dados de velocidade. Isso justifica sua utilização nesta pesquisa.

Filtros gaussianos são amplamente utilizados para redução de ruído, (LIN; WANG; YANG, 1996;

Figura 3.1: Dados de velocidade sem tratamento. Trechos com incidência mais acentuada de erros aleatórios de GPS estão circulosados em vermelho. Os valores são parte do banco de dados do estudo de caso apresentado por Carvalho e Setti (2017).

HUBER; HANEBECK, 2008). A suavização gaussiana funciona de tal forma que um novo valor $\bar{x}(t)$ de um ponto $x(t)$ é a média ponderada de um conjunto de $2n + 1$ pontos centrados em t . O valor suavizado pode ser calculado por (TAUBIN, 1995):

$$\bar{x}(t) = \frac{f(t-n) \cdot x(t-n) + \dots + f(t) \cdot x(t) + \dots + f(t+n) \cdot x(t+n)}{f(t-n) + \dots + f(t) + \dots + f(t+n)} \quad (3.1)$$

em que $\bar{x}(t)$ é o novo valor de $x(t)$; n é o número de observações anteriores e posteriores que são usadas para suavizar $x(t)$; $f(i)$ são os fatores de ponderação para cada observação usada; e $x(i)$ são as observações usadas para calcular $\bar{x}(t)$. O número de pontos usados para estimar o novo valor $x(t)$ é a largura da janela, ou janelamento. No filtro gaussiano, os fatores de ponderação $f(t)$ são distribuídos segundo uma distribuição normal (WALCK, 2007):

$$f(t; \mu; \sigma^2) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x(t) - \mu}{\sigma} \right)^2 \right] \quad (3.2)$$

em que $f(x; \mu; \sigma^2)$ é a função densidade de probabilidade, ou o fator de ponderação, para uma observação $x(t)$, que faz parte de um conjunto de observações cujo desvio padrão é σ e cuja média é μ . A Figura 3.2 é um exemplo de suavização de pontos utilizando as Equações 3.1 e 3.2, em que os valores de velocidade $x(t)$ são função do tempo t para um veículo com GPS embarcado que se desloca em uma rodovia. Verifica-se nessa figura que os dados brutos apresentam oscilações de velocidade acentuadas para observações sucessivas. Em contrapartida, ao suavizar essas observações, obtém-se um perfil de velocidade sem variações abruptas da velocidade e, com isso, mais próximo do comportamento real do veículo.

3.4 Método proposto

O método proposto consiste de cinco etapas: (1) coleta de dados; (2) tratamento dos dados; (3) definição do estaqueamento; (4) seleção do conjunto de observações para cada regressão; e (5) obtenção do valor interpolado da velocidade para cada estaca. Concluído o passo 5, o perfil de velocidade para o veículo pode ser construído a partir dos pares ordenados [estaca, velocidade]. Cada passo do método é discutido nas seções a seguir.

Figura 3.2: Dados brutos e suavizados a partir de observações de GPS (CARVALHO; SETTI, 2017).

3.4.1 Coleta dos dados

O dispositivo embarcado deve fornecer coordenadas geográficas para cada veículo, obtidas a uma frequência constante e conhecida. A velocidade pode ser fornecida pelo dispositivo (velocidade instantânea) ou calculada posteriormente a partir da distância percorrida entre observações sucessivas.

Um observador, situado preferencialmente dentro do veículo, deve registrar a ocorrência de interações significativas do veículo com a corrente de tráfego. Considerações sobre pontos de controle, configuração do dispositivo e outros parâmetros devem atender aos critérios usuais de coleta de dados móveis (MONICO, 2007).

De modo a caracterizar os caminhões, informações referentes ao peso, potência e número de eixos podem ser coletados, respectivamente, por meio de pesagem, entrevista com o condutor e inspeção visual.

3.4.2 Tratamento dos dados de entrada

O tratamento dos dados de entrada inclui quatro subetapas: processamento, cálculo da distância entre pontos, cálculo da velocidade média entre pontos (caso não fornecido pelo dispositivo) e suavização dos valores de velocidade.

O processamento dos dados tem por objetivo corrigir a posição do maior número possível dos pontos coletados, utilizando *software* comercial ou científico. Nessa etapa são também realizadas conversões de coordenadas e exportação dos pontos. Após correção, todos os pontos devem ser exportados (corrigidos ou não) contendo os seguintes parâmetros: identificador único, instante do registro, coordenadas geodésicas (latitude e longitude), coordenadas UTM e altitude (relativa a um elipsoide de referência). Opta-se por utilizar tanto dados corrigidos quanto não corrigidos por dois motivos: pequenos ruídos são atenuados posteriormente através do filtro gaussiano; e erros grosseiros (como multicaminhamento) recebem tratamento em

análise posterior. Após exportação, deve-se vincular um identificador do veículo ou da viagem realizada a cada conjunto de pontos.

Para cálculo da distância entre pontos ordenados, podem ser utilizadas as coordenadas UTM com a altitude, adotando-se a forma de cálculo de distância euclidiana. A velocidade média entre pontos é definida como a razão entre a distância e o tempo entre duas medições subsequentes.

A suavização dos valores de velocidade é realizada a partir do filtro gaussiano, por meio das Equações 3.1 e 3.2, adotando um número de elementos n do intervalo de suavização em função do cenário estudado.

Determinação do janelamento

A escolha do janelamento tem grande efeito na qualidade da suavização: por um lado, o uso de janelas muito grandes pode causar excesso de suavização, eliminando variações sutis do sinal; por outro, janelas muito pequenas permitem alterações bruscas de sinal, visto que se adaptam mais rápido a mudanças de sinal do que janelas grandes (DENG; CAHILL, 1993). Dessa forma, percebe-se que a adoção desse intervalo deve levar em conta as características do caso de estudo.

Em suavizações de sinal é usual adotar o janelamento em função do desvio padrão, como $j = 5\sigma$ (YOUNG; VLIET, 1995) ou valor similar, fazendo com que observações muito maiores que o desvio padrão não causem impacto significativo no valor suavizado. Todavia, no caso dos dados de GPS coletados em trechos rodoviários, em que a velocidade dos veículos pode variar de 0 até 120 km/h ou mais, utilizar janela igual a cinco vezes o desvio padrão das velocidades pode resultar em um número muito grande de observações, acarretando em excesso de suavização. Na Figura 3.3 pode-se observar um perfil de velocidade construído com valores brutos. Para esse perfil, o desvio padrão dos valores observados da velocidade é aproximadamente 20 km/h, portanto o janelamento poderia ser adotado como $j = 5 \cdot 20 = 100 + 1 = 101$ observações. Entretanto, percebe-se na Figura 3.4 que o perfil suavizado com esse janelamento não representa de maneira adequada as oscilações de velocidade em distâncias pequenas. Em contrapartida, verifica-se na mesma figura que as velocidades suavizadas com janela de 11 observações acompanham o traçado geral do perfil bruto e, simultaneamente, abrandam os ruídos nas observações originais. Dessa forma, nota-se que o uso de janelamentos menores pode ser uma boa alternativa para suavização da velocidade.

3.4.3 Estaqueamento e padronização do trecho de referência

O estaqueamento é o sistema de referência usado para localizar a posição do veículo ao longo do trecho, e deve ser realizado de forma que se garanta um número mínimo de observações

Figura 3.3: Perfil de velocidade com valores brutos e suavizados.

Figura 3.4: Detalhe de um perfil de velocidade com valores brutos e suavizados.

nas proximidades de cada estaca, possibilitando ajuste de uma regressão. A distribuição dos pontos ocorre de acordo com a frequência de leitura do dispositivo e da velocidade do veículo.

O cálculo do número de pontos de leitura GPS por segmento entre estacas pode ser feito por meio da expressão adaptada de Quiroga e Bullock (1998):

$$L = N \cdot \frac{u}{3,6} \cdot \Delta t \quad (3.3)$$

em que L é o comprimento do segmento em metros; N é o número de pontos de GPS por segmento; u é a velocidade no segmento, em km/h; e Δt é o inverso da frequência de leitura do GPS, em segundos. Dessa forma, é possível adotar um comprimento de segmento (que equivale à distância entre estacas sucessivas) com base na velocidade máxima esperada, na taxa de coleta do dispositivo e no número de pontos desejado para cada regressão.

No Vissim, as funções de aceleração descrevem a aceleração a ser utilizada por um veículo de acordo com sua velocidade instantânea, que pode variar de 0 até sua velocidade máxima. Portanto, a calibração das funções de aceleração exige que se obtenham informações sobre o deslocamento veicular para todo o intervalo de velocidades possíveis. Para isso, foram concebidos dois trechos de referência: um perfil longitudinal longo, com o intuito de se observar velocidades de equilíbrio e de cruzeiro; e um perfil longitudinal curto, permitindo visualizar a variação da velocidade de um veículo que parte do repouso até atingir a velocidade de cruzeiro. A forma de estaqueamento desenvolvida para cada um desses trechos é descrita a seguir.

3.4.3.1 Estaqueamento com distância fixa entre estacas

A padronização da diretriz da rodovia permite elaborar perfis de velocidade de diversos veículos com base em um mesmo referencial. A maneira escolhida de se obter a diretriz é selecionando aleatoriamente um dos veículos da amostra. O conjunto de coordenadas UTM e de altitude desse veículo pode ser utilizado para interpolar coordenadas (x,y,z) para uma série de novos pontos (estacas) ordenados, cuja distância entre pontos sucessivos é maior ou igual

à determinada na Equação 3.3. As estacas resultantes passam a representar a diretriz da rodovia, permitindo, posteriormente, que as velocidades de diferentes veículos sejam agregadas por estaca e comparadas sob um mesmo referencial.

3.4.3.2 Estaqueamento com variação da distância entre estacas

Ao adotar um comprimento de segmento com base na velocidade máxima do trecho, torna-se possível construir um perfil de velocidade com estacas equidistantes. Entretanto, há casos em que é desejável obter velocidades em pontos a distâncias variadas, como na análise do arranque de um veículo. Nessa situação, para que a rápida variação de velocidade nos segundos iniciais seja propriamente visualizada em função da distância percorrida, é conveniente utilizar um estaqueamento no qual a distância entre estacas aumenta à medida que o veículo ganha velocidade. O inverso pode ser aplicado para análises de frenagem.

3.4.4 Identificação do conjunto de observações para cada regressão

O estaqueamento fornece posições padronizadas, nas quais é possível interpolar a velocidade para cada veículo em cada estaca. O conjunto de observações da velocidade para cada regressão é delimitado por uma distância máxima dos pontos de leitura do GPS em relação à estaca. A escolha da distância máxima depende do estaqueamento adotado e da distribuição de velocidades ao longo do trecho.

Para estaqueamentos iguais ou próximos ao menor comprimento de segmento necessário obtido na Equação 3.3, a distância máxima pode ser adotada como metade do estaqueamento. Segmentos muito longos demandam análise específica do cenário, para que as fases de aceleração e desaceleração não se alternem em excesso dentro da distância máxima adotada.

Além do respeito às fases de aceleração, é importante delimitar uma distância máxima por dois motivos. Em primeiro lugar, uma ou mais estacas sucessivas podem não conter observações. Esse fenômeno pode ocorrer devido à presença de obstrução entre o sinal dos satélites e do dispositivo GPS. Assim, a distância limite serve como uma medida eficaz para localização dessas ocorrências.

Em segundo lugar, é possível que a estaca mais próxima a um conjunto de pontos esteja a uma distância significativamente maior do que a distância máxima. De modo geral, a ocorrência de pontos com coordenadas bastante divergentes das demais é causada por multicaminhamento, gerado pelas reflexões e difrações do sinal de GPS (COUNSELMAN, 1999). As Figuras 3.5(a) e 3.5(c) apresentam, respectivamente, a planta e perfil longitudinal para dados de um veículo em deslocamento em uma rodovia. Nessas figuras, pode-se notar que, para alguns pontos, os valores de suas coordenadas (x, y, z) diferem da tendência observada para os demais. O multicaminhamento é uma das causas prováveis para o deslocamento de alguns pontos em relação ao alinhamento da rodovia.

Observações com multicaminhamento

(a) Planta

(c) Perfil longitudinal

(e) Perfil de velocidade

Observações sem multicaminhamento

(b) Planta

(d) Perfil longitudinal

(f) Perfil de velocidade

Figura 3.5: Planta (a,b), perfil longitudinal (c,d) e perfil de velocidade (e,f) para dois veículos, em que os dados do primeiro, à esquerda (a,c,e) apresentam multicaminhamento e os dados do segundo, à direita (b,d,f) não apresentam tal fenômeno em um mesmo trecho. As observações de GPS (círculos) são interligadas por uma linha preta de acordo com a ordem de registro dos pontos, e possuem cores correspondentes às respectivas estacas (triângulos).

O multicaminhamento implica na distorção da distância acumulada ao longo do deslocamento do veículo. Um exemplo desse fenômeno pode ser verificado nas Figuras 3.5(c) e 3.5(e), que indicam, respectivamente, o perfil longitudinal e velocidade em função da distância acumulada para um veículo cujos dados apresentam multicaminhamento. Se comparados a um conjunto de dados sem erros grosseiros, representados pelas Figuras 3.5(b) e 3.5(d), nota-se que os pontos com multicaminhamento se encontram significativamente afastados do eixo da rodovia, provocando anomalias na velocidade e na distância percorrida, como as velocidades acima de 200 km/h presentes na Figura 3.5(e).

Como o multicaminhamento também provoca o registro de altitudes especialmente discrepantes, sugere-se que as avaliações envolvendo a distância máxima levem em consideração as três dimensões (x, y, z).

Após adoção de uma distância máxima de cada estaca, deve-se determinar o conjunto de observações para cada regressão, vinculando cada ponto à sua respectiva estaca.

3.4.5 Obtenção de velocidade por estaca

O uso de regressão linear é uma alternativa eficaz para a interpolação da velocidade nas estacas, utilizando a velocidade como variável dependente (y) e a distância acumulada como variável independente (x), como ilustrado na Figura 3.6. Uma vez que, neste caso, o estaqueamento é de 100 m, cada regressão utiliza observações feitas a menos de 50 m da respectiva estaca, como mostrado na Figura 3.7.

Figura 3.6: Estimativa da velocidade através de regressão linear utilizando pontos próximos às estacas para velocidades de um mesmo caminhão em função da distância acumulada. As linhas de grade do eixo horizontal coincidem com a posição das estacas (CARVALHO; SETTI, 2017).

As regressões lineares incluem no polinômio de regressão um termo independente (intercepto), que equivale a y quando $x = 0$. Nas regressões com pontos próximos às estacas é possível utilizar a distância de cada ponto à estaca para os valores de x , conforme mostra-se na Figura 3.7. Uma vez que a distância da estaca a si mesma é nula, o intercepto de cada regressão passa a indicar o valor estimado da velocidade na estaca.

Figura 3.7: Regressão linear para estimar a velocidade em função da distância da estaca mais próxima. As velocidades estimadas nas estacas coincidem com o termo independente da regressão linear (CARVALHO; SETTI, 2017).

Há a possibilidade de se obter conjuntos de observações para estacas contendo menos de três elementos. Isso pode ocorrer quando o GPS for incapaz de localizar a constelação de satélites (o que pode ocorrer ao passar sob viadutos, próximo a edifícios altos, árvores, etc.). Nesses casos, adota-se uma das seguintes abordagens:

- Estacas vazias pois não há observações: esses casos podem ocorrer porque (i) o veículo abandonou o trecho de estudo (fazendo com que o veículo seja estacionado para desembarque do pesquisador); ou porque (ii) o dispositivo GPS não registrou o arranque do veículo; ou ainda (iii) porque o arranque do veículo ocorreu à frente da estaca inicial. Como todos os cenários que causam esse fenômeno envolvem um veículo partindo do repouso ou desacelerando até parar completamente, é inferido que o veículo pode ter partido do repouso logo antes (ii) da estaca, ou o veículo estacionou logo à frente (i,ii) da estaca vazia. Portanto, para fins de simplificação, o valor da estaca vazia é estimado como metade do valor de velocidade da observação válida mais próxima.
- Estacas vazias porque as observações não atendem ao critério de distância máxima: para esses casos, é realizada interpolação a partir das velocidades nas estacas vizinhas. Os valores participantes são adotados em função das estacas vizinhas: para a estaca x sem velocidade, caso as estacas $(x - 1)$ e $(x + 1)$ contenham valores válidos, os mesmos são usados na interpolação. Caso contrário, são testados os valores $(x - 2)$ e $(x + 2)$ e o procedimento é repetido.

Com as velocidades determinadas, o perfil pode então ser construído ao plotar os pares ordenados $[estaca, velocidade]$. A coleta de dados mostrada a seguir ilustra o uso do método proposto.

Tabela 3.1: Características das quatro classes de caminhões propostas por Cunha, Modotti e Setti (2008).

Categoria	Eixos	Comprimento médio (m)	PBT médio (t)	Potência/massa média(kW/t)
Leves	2	6,8	6,755	14,81
Médios	3	9,1	13,711	9,29
Pesados	4 e 5	15,5	28,583	8,79
Extrapesados	6 ou mais	16,7	38,072	7,20

3.5 Aplicação do método proposto

O método proposto foi aplicado a um conjunto de dados coletados num trecho rodoviário composto por uma sucessão de rampas íngremes e longas, onde a velocidade dos caminhões varia bastante, frequentemente atingindo a velocidade de equilíbrio nos aclives. A coleta foi realizada na rodovia Antônio Machado Sant’anna (SP-255), entre os quilômetros 7 e 46, nos dias 15 a 19, 22 e 23 de janeiro de 2018. Nesse trecho, a velocidade máxima regulamentada é 110 km/h para veículos de passeio e 90 km/h para caminhões. Há uma balança rodoviária no quilômetro 26, a qual foi utilizada como ponto de partida para os caminhões que seguiam no sentido Norte (km 26–46) e no sentido Sul (km 26–7).

Foram utilizados dois dispositivos GNSS Leica, modelo GX1230GG: um equipamento foi instalado como ponto de controle na balança rodoviária, ao passo que o outro foi embarcado nos caminhões. Ambos foram configurados, com frequência de 1 Hz, para coleta de dados geodésicos e de altitude em relação ao referencial WGS84. Foram coletados dados para 57 caminhões, obtendo-se em média 891 observações por veículo. Além dos dados de velocidade, foram registrados o número de eixos, peso (aferido na balança) e, em entrevista com o condutor, a potência para cada veículo amostrado.

Neste trabalho, os caminhões são segregados em categorias de acordo com o número de eixos. A classificação utilizada e as especificações veiculares médias para cada categoria foram propostas por Cunha, Modotti e Setti (2008), e pode ser vista na Tabela 3.1. A coleta foi direcionada de modo a se obter caminhões distribuídos ao longo da faixa de potência/massa representativa para cada classe. A Figura 3.8 apresenta as distribuições dos valores de potência/massa para cada categoria.

Para processamento dos dados coletados por GPS, foi utilizado o *software* Leica Geo Office. Além dos dados coletados em campo, utilizou-se como referência a estação da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS da Escola de Engenharia de São Carlos, da qual são fornecidos pontos medidos a cada 15 segundos.

As demais etapas do método proposto foram implementadas por meio de um *script* em linguagem Python 3.6. Para suavização, foi utilizado filtro gaussiano com janelamento de 11 observações. A largura da janela foi adotada a partir de análises visuais como a da Figura 3.4 para janelas de 3 a 15 observações, selecionando-se uma janela capaz de atenuar ruídos signi-

Figura 3.8: Distribuição dos valores da relação potência/massa dos caminhões.

ficativos sem modificar o comportamento geral do perfil de velocidade bruto.

O trecho de rodovia escolhido apresenta limite de velocidade de 110 km/h. Adotou-se então um valor ligeiramente superior de 120 km/h (em função do valor máximo de velocidade observado na coleta) para cálculo do comprimento de segmento mínimo. Sabendo-se que a taxa de coleta do GPS é de 1 segundo e desejando-se ao menos $N = 3$ pontos para cada regressão, obteve-se através da Equação 3.3 um segmento $L = 100$ m, que foi o estaqueamento adotado.

Para obtenção dos conjuntos de observações para cada estaca, foi adotada distância máxima de 50 m. Esse valor permite o uso de todos os pontos que estiverem próximos ao alinhamento do estaqueamento e elimina observações muito distantes do eixo padronizado da rodovia como, por exemplo, o caso observado na Figura 3.5(a), em que alguns pontos se encontram significativamente afastados do alinhamento das demais observações.

Os conjuntos de observações para cada estaca são então utilizados para cálculo das velocidades através das regressões lineares. Por fim, é possível traçar os perfis de velocidade suavizados, como o que pode ser observado na Figura 3.9. Todos os perfis de velocidade brutos e suavizados obtidos neste trabalho são apresentados no Apêndice A.

3.6 Considerações finais

Neste capítulo foram apresentadas as etapas para construção de perfis de velocidade estaqueados, bem como um conjunto de perfis de velocidade obtidos segundo as diretrizes propostas. Verificou-se que o procedimento proposto é capaz de gerar perfis satisfatórios para avaliação do deslocamento de veículos em rodovias. Os perfis gerados servem como dados para a calibração do microssimulador de tráfego, procedimento que é abordado no próximo capítulo.

Figura 3.9: Perfis de velocidade com dados brutos e suavizados para um caminhão amostrado (caminhão 53).

Calibração do modelo de desempenho de caminhões

4.1 Introdução

Modelos de simulação computacional são utilizados em diversas áreas da ciência, pois permitem prever, reproduzir e avaliar cenários reais e hipotéticos. Em estudos de tráfego, o amplo uso dessas ferramentas é justificado pelo baixo custo, ausência de risco e rapidez com que os dados são obtidos (PARK; QI, 2005). Através da combinação de diversos modelos matemáticos, os simuladores são capazes de reproduzir fenômenos reais de grande complexidade. Essa capacidade permite o estudo e avaliação de teorias acerca desses fenômenos por meio de sua comparação com os cenários simulados (HEERMANN, 1990).

Os simuladores apresentam um ou mais conjuntos de configurações padrão para cada um de seus modelos matemáticos. Cada conjunto é elaborado de modo que a reprodução de cenários específicos de tráfego – em geral condizentes à frota e aos motoristas do país de origem do simulador – reproduza a corrente de tráfego real com um grau de fidelidade satisfatório. Entretanto, as características veiculares e comportamentais podem variar não só entre países, como também entre regiões de um mesmo país. Dessa forma, é desejável calibrar o simulador às condições do local de estudo para que os dados simulados sejam confiáveis (HOURDAKIS; MICHALOPOULOS; KOTTOMMANNIL, 2003).

No Brasil, os esforços para calibrar simuladores se concentram nos modelos que regem as interações entre veículos (EGAMI; SETTI; RILLET, 2004; MEDEIROS et al., 2013; BETHONICO; PIVA; SETTI, 2016), existindo poucos trabalhos voltados à calibração do desempenho veicular (CUNHA; BESSA; SETTI, 2009). Assim, o objetivo desta pesquisa foi calibrar o modelo de desempenho veicular do Vissim para caminhões brasileiros. Para isso, foi utilizado um trecho rodoviário real, de relevo ondulado, de cerca de 18 km. A calibração foi realizada através da comparação de

perfis de velocidade de caminhões reais e simulados trafegando ao longo do trecho de estudo, sendo que os dados reais são obtidos a partir do tratamento de dados de GPS. A automatização da calibração foi realizada através de um algoritmo genético, visto que essa técnica possui respaldo abrangente na literatura referente à calibração de simuladores de tráfego tanto no âmbito nacional (EGAMI; SETTI; RILLET, 2004; CUNHA; BESSA; SETTI, 2009; MEDEIROS et al., 2013; BETHONICO; PIVA; SETTI, 2016) quanto internacional (KIM; RILETT, 2001; MA; ABDULHAI, 2001; CIUFFO; PUNZO, 2014; TETTAMANTI et al., 2015; LIDBE; HAINEN; JONES, 2017). Uma versão anterior do texto deste capítulo foi apresentada no XXXII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, realizado em novembro de 2018, em Gramado (CARVALHO; SETTI, 2018). O texto daquele trabalho foi adaptado para esta dissertação.

4.2 Simuladores de tráfego e a necessidade de calibrá-los

Apesar do longo histórico de pesquisas com simuladores de tráfego, a necessidade de calibrá-los passa a ser um tema importante apenas a partir da década de 1990. A defasagem desse assunto em relação ao uso dessas ferramentas em transportes se justifica pela maneira como esses programas se desenvolveram: os primeiros simuladores de tráfego foram criados e validados para simular um ou poucos cenários específicos, ao passo que seus sucessores foram concebidos para reproduzir condições cada vez mais abrangentes (KOTUSEVSKI; HAWICK, 2009). Como os simuladores atuais são criados e validados para simular redes genéricas, a calibração se tornou necessária para se obter resultados mais próximos dos observados em cenários locais (JAYAKRISHNAN; OH; SAHRAOUI, 2001; HOURDAKIS; MICHALOPOULOS; KOTTOMMANNIL, 2003).

Dentre as diversas formas de se calibrar os modelos dos simuladores, as mais frequentes envolvem os modelos de *car-following* e *lane-change* (CHU et al., 2003). Todavia, o grande número de variáveis, a dificuldade em se obter os dados necessários e o custo computacional elevado fazem com que, de modo geral, os modelos e lógicas internas dos simuladores não sejam calibrados regularmente. Assim, o uso corriqueiro dos simuladores se dá apenas com o ajuste de matrizes origem/destino e alteração de poucas variáveis comportamentais através da experiência do modelador (BALAKRISHNA et al., 2007).

Em microssimuladores de tráfego, os modelos envolvidos recriam o fluxo veicular por meio da geração de veículos com comportamentos individuais. Dessa forma, utilizar medidas agregadas de tráfego para calibração desses modelos de maneira isolada não é adequado, uma vez que as medidas agregadas são influenciadas pela combinação de vários modelos simultaneamente (TOLEDO et al., 2004). Em contrapartida, a coleta de dados desagregados é difícil e possui alto custo (BALAKRISHNA et al., 2007), tornando a calibração dos simuladores uma tarefa complexa. Apesar dessa dificuldade, Li, Zuylen e Xu (2015) realizaram a calibração da função de aceleração desejada do Vissim para carros de passeio através de dados de GPS obtidos para veículos individuais trafegando em vias urbanas. Logo, é esperado que essa abordagem possa

ser aplicada para trechos rodoviários.

Para calibrar modelos de desempenho veicular, os procedimentos usuais envolvem a simulação de trechos compostos por uma rampa longa precedida por uma seção plana na qual ocorre a estabilização da velocidade do caminhão (CUNHA; BESSA; SETTI, 2009). Embora essa abordagem possibilite comparar a velocidade de equilíbrio, tal combinação de rampas raramente ocorre, uma vez que o relevo ondulado, caracterizado pela alternância constante entre aclives e declives, é o mais comum.

O objetivo da calibração é obter funções de aceleração para quatro categorias de caminhões, ajustando os pontos [*velocidade, aceleração*] que definem cada uma das funções, com o intuito de se minimizar a diferença entre perfis de velocidade reais e simulados para caminhões. A definição da categorização dos veículos e as modificações do simulador necessárias para a calibração são expostas a seguir.

4.3 Abordagem utilizada

A configuração padrão do Vissim prevê apenas uma categoria para caminhões. Porém, a frota de caminhões brasileiros é heterogênea, sendo que cada veículo pode apresentar combinações bastante variadas de suas características (potência, massa, número de eixos, idade, estado de manutenção, por ex.). Assim, calibrar funções de aceleração para mais de uma categoria de caminhão é uma forma de se obter resultados mais ajustados para subgrupos com características em comum. Neste trabalho utiliza-se a categorização dos caminhões brasileiros proposta por Cunha, Modotti e Setti (2008), que divide-os em quatro categorias: leves (2 eixos); médios (3 eixos); pesados (4 e 5 eixos) e extrapesados (6 ou mais eixos).

Como as funções de aceleração regem o deslocamento independente dos veículos, isto é, sem interação com o tráfego, é necessário obter dados reais de caminhões trafegando nestas condições para calibrar o simulador. No Capítulo 3, apresentou-se um método para coleta, tratamento e obtenção de perfis de velocidade de veículos individuais, que podem ser utilizados como medida de ajuste das funções.

Entretanto, o Vissim é um simulador estocástico, em que os valores de massa, potência e velocidade desejada (MPVd) de cada veículo são aleatorizados com base em distribuições de frequência acumulada para cada uma dessas variáveis. Consequentemente, comparar os perfis de velocidade reais e simulados nessas condições não traria uma calibração satisfatória, uma vez que as propriedades MPVd dos caminhões comparados seria diferente. Assim, faz-se necessário obter uma configuração não-estocástica do simulador para calibração.

Figura 4.1: Configuração do simulador para calibração das funções de aceleração. Para cada caminhão amostrado, cria-se um “tipo” veicular no simulador. Cada tipo de caminhão possui uma distribuição de frequência acumulada para cada propriedade MPVd, cuja configuração fixa o valor dessas variáveis para cada caminhão. Por fim, todos os tipos de caminhão pertencentes a uma mesma categoria utilizam as mesmas funções de aceleração máxima e desejada.

4.3.1 Preparação do simulador para calibração

Por padrão, os tipos veiculares do Vissim correspondem a categorias veiculares (por ex.: Tipo 1 - carros, Tipo 2 - caminhões). A cada tipo veicular são atribuídas três distribuições de frequência acumulada, uma para cada característica MPVd, e um conjunto de funções de aceleração.

Para tornar possível comparar veículos reais e simulados com valores iguais de MPVd, optou-se por modificar o conceito dos tipos veiculares do Vissim, fazendo com que cada tipo corresponda a um caminhão amostrado, ou seja, com valores de MPVd conhecidos e constantes. Os caminhões de uma mesma categoria utilizam um mesmo conjunto de funções de aceleração, permitindo que uma categoria seja calibrada simulando todos os caminhões a ela pertencentes. A Figura 4.1 apresenta um esquema genérico dessa configuração. Nessa figura, os n caminhões amostrados são classificados em ω categorias. Cada caminhão é lançado como um “tipo” de acordo com a nomenclatura do Vissim. Por isso, cada tipo de caminhão possui seus valores únicos de MPVd. Por exemplo: os tipos de caminhão $(1, 2, \dots, \alpha)$ pertencem à categoria α , portanto utilizam as funções de aceleração máxima α e desejada α .

Assim, foi preciso configurar as distribuições de MPVd para cada caminhão para que elas usem valores fixos, impossibilitando a geração de veículos aleatórios. As distribuições foram

configuradas como dois pares de valores: $Y(0\%)$, para a frequência acumulada 0%; e $Y(100\%)$, para a frequência acumulada de 100%. Como o Vissim não permite que $Y(0\%) = Y(100\%)$, admitiu-se que $Y(0\%) = Y(100\%) - 0,001$, para que o valor da propriedade de MPVd fosse constante, qualquer que seja o valor sorteado pela distribuição.

4.4 Método proposto

De modo sucinto, a calibração foi obtida através de um algoritmo genético, em que cada indivíduo é uma combinação possível de curvas-limite que compõem as funções de aceleração máxima e desejada, sendo que cada curva-limite é um conjunto de pares ordenados [*velocidade, aceleração*]. Inicia-se a apresentação do método com dois aspectos importantes do algoritmo genético: os dados reais e a função *fitness* calculada ao fim da função de avaliação. Depois, descreve-se como foi realizada a criação de quatro redes no simulador, sendo uma para cada categoria de caminhão. Segue-se com a discussão da implementação do algoritmo genético e, por fim, aborda-se a validação das funções de aceleração.

4.4.1 Dados de entrada

Os perfis de velocidade são utilizados para avaliar o *fitness* das funções de aceleração. Foram obtidos perfis de velocidade para 57 caminhões utilizando GPS para registrar suas posições ao trafegar pela rodovia SP-255 conforme descrito no capítulo anterior.

Duas formas de estaqueamento foram adotadas para construção dos perfis de velocidade. Para análise da velocidade de cruzeiro foram utilizados perfis com estaqueamento de 100 metros. Para obtenção da velocidade na arrancada, isto é, partindo do repouso e acelerando até atingir velocidade de cruzeiro, foram elaborados perfis com estaqueamento variado. A distância entre cada estaca foi definida de modo que cada estaca dispusesse de três ou mais valores de velocidade para interpolação. Os perfis resultantes dessa abordagem foram delimitados como os 1,5 km iniciais do trecho de estudo, dado que esse comprimento é suficiente para todos os veículos da amostra atingirem velocidade de cruzeiro a partir do repouso.

A velocidade desejada para cada caminhão foi definida como o 90º percentil das velocidades de cruzeiro do respectivo veículo. Esse patamar foi adotado após se identificar que, apesar dos veículos amostrados serem aptos a atingir velocidades altas, não eram capazes de mantê-las por trechos longos, restringindo-se a velocidades próximas do 90º percentil. A Figura 4.2 apresenta a distribuição de frequência acumulada das velocidades desejadas obtidas a partir dos percentis observados.

Figura 4.2: Distribuição de frequência acumulada das velocidades desejadas (CARVALHO; SETTI, 2018).

4.4.2 Função *fitness*

A função *fitness*, isto é, a função que retorna a medida da qualidade da calibração das funções de aceleração, foi estabelecida como uma combinação de duas medidas de erro, calculadas em dois trechos: no de arranque e no de cruzeiro. A primeira medida utiliza a média dos erros entre observações reais e simuladas de velocidade com o intuito de se obter uma média do erro próxima a zero. Essa medida é representada por:

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{c=1}^N \left\{ \frac{1}{M(c)} \sum_{i=1}^{M(c)} [V_c^s(i) - V_c^r(i)] \right\}, \quad (4.1)$$

em que μ é a média das médias dos erros simples na velocidade de cada caminhão; c é o índice que representa a categoria dos caminhões (leves, médios, pesados ou extrapesados); N é o total de caminhões da categoria c ; i é o índice que representa a estaca ao longo do percurso; $M(c)$ é o número de estacas pelas quais o c -ésimo caminhão trafegou; $V_c^s(i)$ e $V_c^r(i)$ são, respectivamente, as velocidades simulada e real (observada) do c -ésimo caminhão na i -ésima estaca ao longo do trecho percorrido.

A segunda medida utiliza os quadrados dos erros nas velocidades com o intuito de penalizá-los com base na sua distância dos valores reais. Essa medida é dada pela equação:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{c=1}^N \left\{ \frac{1}{M(c)} \sum_{i=1}^{M(c)} [V_c^s(i) - V_c^r(i)]^2 \right\}}, \quad (4.2)$$

em que ε é a raiz quadrada da média das médias dos quadrados dos erros nas observações de velocidade de cada caminhão.

Por fim, o *fitness*, que mede a qualidade da calibração, é obtido pela função:

$$F = \frac{\mu_a + \mu_f + p \varepsilon_a + \varepsilon_f}{4}, \quad (4.3)$$

Figura 4.3: Esquema dos *links* padrão de arranque e de cruzeiro.

em que F é o *fitness* para um indivíduo (isto é, um dado conjunto de parâmetros de calibração do modelo de desempenho) na população que forma a geração atual; a e f indicam, respectivamente, os trechos de arranque e de cruzeiro para os quais as medidas μ e ε são calculadas; e p é o fator de penalidade para a medida ε no trecho de arranque (onde ocorre a aceleração inicial). O valor de p foi empiricamente fixado em 0,2 porque se detectou que essa medida poderia representar cerca de 80% do *fitness*, o que praticamente eliminaria a contribuição das demais medidas no valor total de F , prejudicando a calibração das funções de aceleração.

4.4.3 Criação das redes para simulação

Foi criada uma rede para cada categoria de caminhão a ser calibrada. Tomando-se o perfil longitudinal (trajetória) de um caminhão aleatório como referência, a rodovia foi reproduzida como um *link* contendo uma única faixa de tráfego. A seguir, esse trecho foi clonado, permitindo-se utilizar um *link* para análise da velocidade de cruzeiro e outro para o arranque. Os respectivos trechos receberam então sensores de tráfego, os quais registram a velocidade de cada veículo que trafega sobre eles. Os sensores foram instalados nas mesmas posições das estacas e são equidistantes em 100 m no trecho de cruzeiro.

Para o trecho de arranque, os sensores estão localizados em função da velocidade esperada dos veículos ao longo do trecho. Esse trecho tem um semáforo em sua origem, para que os caminhões que trafegam pelo *link* precisem sair do repouso. Por fim, o trecho de arranque tem cerca de 1,5 km, mais que suficiente para o caminhão atingir a velocidade de cruzeiro. A Figura 4.3 apresenta um esquema dos *links* de arranque e de cruzeiro.

Os trechos de referência foram definidos e, em seguida, clonados, obtendo-se para cada caminhão da categoria dois *links*: um trecho de arranque e um trecho de cruzeiro. A seguir, cada par de *links* foi alimentado com fluxo veicular contendo apenas um caminhão. Utilizando-se fluxo de 60 veíc/h por 1 minuto inicial, pode-se simular o deslocamento de apenas um caminhão por *link*, garantindo a ausência de interação veicular.

Figura 4.4: Fluxograma geral do algoritmo implementado.

No Vissim, os veículos cuja razão potência/massa se encontra fora dos limites pré-definidos (7 a 30 kW/t) recebem uma curva de aceleração igual ao limite mais próximo. Como pode ser observado na Figura 3.8, parte significativa dos valores de potência/massa da amostra se encontram fora dos limites padrão do Vissim. Para evitar que o simulador não considerasse a diferença de desempenho dos veículos não enquadrados nesse intervalo, optou-se por modificar os limites da razão potência/massa. Para os caminhões amostrados, obteve-se relação potência/massa média $\mu = 12,73$ kW/t e desvio-padrão $\sigma = 5,21$ kW/t. Os novos limites foram adotados como $\mu \pm 2\sigma$, obtendo-se, respectivamente 2,3 e 23,2 kW/t.

Por fim, o tempo de simulação foi estipulado como 40 minutos, que é aproximadamente o dobro do necessário para que os caminhões reais completem o percurso ao longo do trecho.

4.4.4 Implementação do Algoritmo Genético

O algoritmo genético foi implementado em Python 3.6 no ambiente Spyder 3.2.6. Além da função de avaliação do *fitness*, foram codificadas rotinas para cruzamento, mutação e criação de indivíduos. Vale destacar que essas três últimas rotinas apresentam uma série de restrições, dado que o Vissim exige que as funções de aceleração apresentem o formato característico da Figura 2.1. A Figura 4.4 apresenta um fluxograma do algoritmo utilizado.

Os indivíduos foram criados e modificados considerando apenas a existência dos limites superior e inferior das funções de aceleração, isto é, desconsiderando as curvas medianas. Essa decisão diminuiu as restrições para operações entre genes, aumentando a variabilidade

genética da população. A reconstrução das curvas medianas é realizada sempre que o *fitness* de um indivíduo precisa ser avaliado. Os valores de aceleração da curva mediana são obtidos a partir da média entre o limite inferior e o limite superior de aceleração para cada valor de velocidade.

A cada geração, 30% dos indivíduos da população (exceto o melhor indivíduo) são sorteados para sofrer mutação. Uma vez que um indivíduo é selecionado, cada um de seus genes tem 20% de chance de sofrer modificações. A mutação foi realizada tentando-se somar um número aleatório entre $\pm 0,2 \text{ m/s}^2$ ao gene sorteado para mutação. Caso o resultado não fosse válido segundo os critérios do simulador (aceleração negativa, aceleração mínima maior que a máxima, entre outros casos), um novo valor aleatório era sorteado, verificando-se a nova soma. O procedimento se repete por até cinco vezes e, caso nenhuma das tentativas resulte num novo gene válido, o valor original do gene é mantido.

Adotou-se um ciclo para ocorrência da predação correspondente a 10% do total do número de gerações (ex.: para número total de gerações igual a 100, a predação ocorrerá nas gerações 10, 20,..., 90, 100). A cada predação, os indivíduos da população atual são ordenados de forma crescente de acordo com seus valores *fitness*. Os indivíduos que compõem o 25º percentil desse conjunto ordenado são então eliminados, e uma igual quantia de indivíduos é gerada aleatoriamente, concluindo a etapa de predação.

A função de avaliação do *fitness* consiste nas seguintes etapas: simular a rede com a configuração das funções de aceleração do indivíduo; ler os relatórios da simulação; extrair do relatório as velocidades dos sensores; e calcular o *fitness* do indivíduo, usando a Equação 4.3.

Ao fim da execução do algoritmo genético, emite-se um relatório contendo as configurações do algoritmo utilizadas, os valores das funções de aceleração do melhor indivíduo, a medida do seu *fitness* e métricas acerca das fases de cruzamento e mutação. Um segundo relatório contém os melhores e piores indivíduos de cada geração, bem como o máximo, média, mínimo e desvio padrão do *fitness* de cada população.

Dos 57 caminhões que compõem o banco de dados, 13 veículos não foram utilizados na calibração. Desses, 11 foram reservados para a fase de validação e dois foram excluídos do banco de dados. O primeiro veículo excluído ($c = 33$) apresentou relação potência/massa igual a 26 kW/t, valor acima do limite máximo de 23,2 kW/t estipulado para essa relação. O segundo caminhão foi eliminado em função de problemas nos dados coletados pelo GPS em parte do percurso que inviabilizaram os resultados (velocidades registradas superiores a 200 km/h). Os valores discrepantes de velocidade para esse veículo ($c = 25$) podem ser verificados entre as estacas 130 e 140 na Figura A.3.

As funções para cada categoria foram calibradas de modo independente entre si por meio de execuções isoladas do algoritmo genético, em que o critério de parada é o total de gerações desejado. Foram executadas calibrações com diferentes configurações do algoritmo genético,

Tabela 4.1: Combinações de parâmetros utilizados no algoritmo genético (CARVALHO; SETTI, 2018).

Indivíduos na população	Número de gerações	Total de iterações (avaliações do <i>fitness</i>)	Tempo de processamento aproximado (horas)
31	31	1017	6
41	41	1769	12
51	51	2705	18
61	61	3849	24
75	75	5796	36
85	85	7423	48
105	105	11268	72

variando o tamanho populacional e o número de gerações. Aumentar essas duas propriedades simultaneamente aumenta o número de indivíduos modificados, visto que as etapas do algoritmo genético (cruzamento, mutação e predação) utilizam o tamanho populacional para estabelecer a quantia de indivíduos modificados em cada uma dessas etapas, e o número de gerações aumenta a ocorrência das mesmas. Além disso, é necessário avaliar o *fitness* de um indivíduo sempre que ele é modificado. Isso acarreta no aumento do total de avaliações do *fitness* de indivíduos, que, por sua vez, implica em se testar mais soluções possíveis para a calibração, exigindo, todavia, mais tempo de execução do algoritmo. Os tamanhos de população e número gerações utilizados, o total de avaliações do *fitness* obtidos com essas configurações e o tempo de processamento podem ser visualizados na Tabela 4.1. A execução dessas diferentes configurações do algoritmo genético teve por objetivo verificar se haveria melhoria significativa nos melhores indivíduos ao se executar o algoritmo por mais tempo.

4.5 Análise dos resultados da calibração

As Figuras 4.5 e 4.6 apresentam os valores *default* para as funções de aceleração máxima e desejada (indicadas como HGV Vissim), bem como as melhores configurações para quatro categorias de caminhão obtidas para duas combinações de número de gerações e tamanho da população. Vale destacar que os limites das funções de aceleração calibradas referem-se ao intervalo de potência/massa entre 2,3 e 23,2 kW/t, ao passo que as funções originais utilizam 7 a 30 kW/t.

Verifica-se que, de modo geral, as funções de aceleração máxima calibradas apresentam formato similar às originais para velocidades entre 30 e 80 km/h. Todavia, os valores calibrados são consideravelmente inferiores. Duas hipóteses são levantadas para justificar esse fenômeno. Em primeiro lugar, é possível que os valores inferiores sejam causados pelo uso parcial da potência do motor. Como os condutores não foram solicitados a dirigir de uma maneira específica, é provável que os mesmos não tenham utilizado toda a potência disponibilizada por seus motores. Logo, os valores de aceleração obtidos se referem ao uso de potência desejado

Figura 4.5: Funções de aceleração máxima e desejada obtidas com 85 gerações e 85 indivíduos.

Figura 4.6: Funções de aceleração máxima e desejada obtidas com 105 gerações e 105 indivíduos.

pelos condutores, e não à potência máxima possível. Além disso, a potência máxima possível depende das condições do motor (manutenção, idade, etc.) e, portanto, as funções resultantes são afetadas pela diferença entre potência nominal e real. Essa hipótese é corroborada pelas funções de aceleração máxima apresentadas nas Figuras 4.5 e 4.6, que são sempre inferiores às originais.

A função de aceleração desejada calibrada apresentou limites superiores com formato similar ao original entre 0 a 80 km/h. Destaca-se que, nos limites inferiores, as acelerações entre 0 e 60 km/h são significativamente mais baixas que a configuração *default*. Isso implica que diferenciar os valores de aceleração desejada em função da potência/massa para velocidades baixas provoca redução no erro da simulação em relação à velocidade dos caminhões.

Identificou-se que as diferentes combinações de número de gerações/tamanho da população geraram funções calibradas com formatos similares entre si para o intervalo de 0 a 90 km/h. Todavia, um aspecto peculiar das funções obtidas é que os valores da aceleração para velocidades acima de 90 km/h diferem significativamente entre alternativas do algoritmo (número de gerações, tamanho da população, entre outros aspectos), para uma mesma categoria de caminhões. Isso pode ser observado comparando-se as funções da Figura 4.5 com as funções da Figura 4.6. Isso provavelmente deve-se ao fato de que há poucas observações de velocidades reais acima de 90 km/h.

Figura 4.7: Melhor *fitness* obtido por categoria utilizando diferentes configurações do algoritmo genético (CARVALHO; SETTI, 2018).

A qualidade da calibração pode ser observada na Figura 4.7, em que se apresentam os valores de *fitness* dos melhores indivíduos obtidos com diversas combinações de população e gerações. Na mesma figura, pode-se observar os valores de *fitness* obtidos com a configuração original do Vissim, identificando-se que, para todas as replicações do algoritmo, para todas as categorias, as configurações obtidas para as funções resultam em *fitness* menor que o observado para a configuração original do simulador. Nota-se também que o valor do *fitness* do melhor indivíduo apresenta pouca variação dentro de uma mesma categoria para todas as replicações do algoritmo.

A Figura 4.8 apresenta perfis de velocidade reais e simulados para um mesmo caminhão. Para os perfis simulados, é possível notar que suas velocidades são limitadas pelo patamar de velocidade desejada. Dessa forma, o *fitness* para cada caminhão é insensível às velocidades acima do 90º percentil dos respectivos valores reais pois, para qualquer configuração possível das funções de aceleração, os veículos simulados nunca atingem velocidade maior que a desejada. Neste trabalho, verifica-se através da distribuição de frequência acumulada das velocidades desejadas (Figura 4.2) que a maior velocidade simulada possível é de 101 km/h. Por isso, o formato das diferentes funções calibradas (Figuras 4.5 e 4.6) varia consideravelmente na região de velocidades acima de 100 km/h, sem provocar diferença significativa entre os valores de *fitness* para essas funções (Figura 4.7). Logo, o valor de velocidade desejada influencia de maneira direta na região de calibração das funções de aceleração.

4.6 Análise dos resultados da validação

Nas Figuras 4.9 e 4.10 são apresentados os perfis de velocidade com dados reais, simulados na configuração original e recalibrada com as funções de aceleração obtidas com 105 gerações e 105 indivíduos por geração para os 11 caminhões reservados à etapa de validação. Identificou-

Figura 4.8: Perfis de velocidade para um mesmo caminhão (3 eixos, $c=44$, 8 kW/t) utilizando dados reais e simulados.

se que o modelo de desempenho calibrado resulta em perfis de velocidade simulados mais ajustados aos dados reais para as categorias Leves, Pesados e Extrapesados se comparados aos perfis obtidos com a configuração original do simulador. Para a categoria Médios, entretanto, ambas as configurações do simulador resultam em perfis parcialmente ajustados aos dados reais, contrastando com o observado para as demais categorias. Alguns fenômenos podem contribuir para esse comportamento. É possível que essa categoria apresente perfis de velocidade mais heterogêneos que as demais. Como o modelo de desempenho é calibrado para minimizar o erro em todos os perfis de velocidade da categoria simultaneamente, o ajuste a um conjunto heterogêneo de dados pode significar que alguns perfis se tornam melhores ajustados que outros.

Percebe-se através das Figuras 4.9 e 4.10 que os perfis para dados reais e simulados pós-calibração se aproximam nas regiões com velocidades mais baixas, que coincidem com aclives longos e/ou de maior inclinação, que são mais frequentes no trecho de coleta a Norte da balança rodoviária. Em contrapartida, todos os veículos da categoria Médios usados na validação percorreram o trecho Sul, que apresenta relevo menos ondulado que o Norte. Logo, é possível que a região Norte contribuiu de forma mais significativa ao *fitness*, implicando em funções mais ajustadas para representação de aclives mais íngremes que os observados no trecho Sul.

Figura 4.9: Perfis de velocidade para os caminhões utilizados na fase de validação das categorias Leves e Médios.

4.7 Considerações finais

Por meio do método proposto, foi possível realizar a calibração das funções de aceleração máxima e desejada do Vissim para caminhões brasileiros. A partir das considerações adotadas, destaca-se que as funções possuem valores satisfatórios para velocidades entre 0 e 90 km/h. Ainda, os limites da razão potência/massa devem ser ajustados para utilização das funções calibradas.

Sugere-se que calibrações futuras realizem uma análise aprofundada para adoção da velocidade desejada, dada sua importância tanto para o funcionamento do Vissim quanto para a avaliação do ajuste das funções.

A possibilidade de existir diferença no *fitness* de acordo com as características do relevo merece futura investigação. Como o *fitness* é dependente das medidas de erro utilizadas em

Figura 4.10: Perfis de velocidade para os caminhões utilizados na fase de validação das categorias Pesados e Extrapesados.

sua formulação, pode-se iniciar a investigação desse fenômeno por meio de uma avaliação mais detalhada da função *fitness* empregada nesta calibração.

Recomenda-se também que seja analisada a importância de se calibrar funções diferentes para cada categoria de caminhão. Aumentar-se a quantidade de execuções do algoritmo permitiria avaliar quão significativas são as diferenças entre categorias. Uma segunda implicação seria obter funções de aceleração máxima e desejada para uma categoria única de caminhões a partir da média dos valores obtidos para os caminhões segregados.

Por fim, encerrou-se neste capítulo a descrição dos esforços para se calibrar o modelo de desempenho do Vissim. Nos Capítulos 5 e 6, a seguir, ilustra-se a importância de se calibrar o simulador por meio de uma análise dos equivalentes veiculares obtidos com o simulador calibrado e não-calibrado.

Equivalentes veiculares para caminhões em trechos planos

De modo a se demonstrar as implicações decorrentes da calibração dos simuladores de tráfego, os próximos capítulos apresentam um estudo de caso que visa verificar a diferença entre equivalentes veiculares para caminhões obtidos por meio de dados simulados com o Vissim em duas configurações distintas: a original e a configuração contendo a calibração dos parâmetros de *car-following*, *lane-change* e de desempenho dos caminhões. Para tal, apresenta-se o método adotado para cálculo dos equivalentes, bem como as diretrizes para construção da rede de simulação e uma análise dos resultados. Neste capítulo, discute-se o método e equivalentes veiculares resultantes para um trecho rodoviário plano.

5.1 Equivalentes veiculares através do método de Huber

Carro-de-passeio equivalentes (*passenger-car equivalents*) é um conceito utilizado em análises de capacidade e nível de serviço para representar o impacto causado por veículos pesados no desempenho da corrente de tráfego. O impacto causado por veículos pesados pode incluir redução na velocidade da corrente, uso de espaço físico maior que o utilizado por carros de passeio, dentre outros. Em decorrência do desempenho mecânico de caminhões e de suas dimensões físicas, os equivalentes veiculares para esses veículos variam em função da proporção de caminhões na corrente de tráfego e das características geométricas (comprimento e inclinação) do trecho rodoviário em análise (TRB, 2000, Capítulo 13).

O método proposto por Huber (1982) para obtenção de equivalentes veiculares se baseia na relação entre os valores de fluxo para uma corrente de tráfego básica (composta somente por automóveis) e para uma corrente mista (automóveis e caminhões), sendo que os valores de fluxo para ambas as correntes são determinados para um mesmo valor de uma medida

Figura 5.1: Determinação dos fluxos básico e misto para um mesmo valor de impedância.

de impedância. A partir da relação fluxo-impedância para cada corrente de tráfego, pode-se determinar os valores de fluxo básico (q_b) e fluxo misto (q_m) como demonstrado na Figura 5.1. O equivalente veicular pode então ser calculado por (HUBER, 1982):

$$PCE = \frac{1}{p} \left[\frac{q_b}{q_m} - 1 \right] + 1, \quad (5.1)$$

em que PCE é o equivalente em carros de passeio; p é a porcentagem de caminhões na corrente mista; e q_b e q_m são, respectivamente, os valores de fluxo da corrente básica e da corrente mista obtidos para um mesmo valor da medida de impedância.

Diversas variáveis podem ser utilizadas como medida de impedância, sendo comumente utilizadas a velocidade (ELEFTERIADOU; TORBIC; WEBSTER, 1997), veículo-horas (SUMNER; HILL; SHAPIRO, 1984), e densidade (WEBSTER; ELEFTERIADOU, 1999). Optou-se, para este trabalho, pela densidade como medida de impedância, uma vez que, para rodovias de pista dupla (*freeways*) o nível de serviço é determinado através da densidade conforme indicado no HCM 2010 (WEBSTER; ELEFTERIADOU, 1999; TRB, 2010).

As funções fluxo-densidade podem ser obtidas através de uma regressão linear para um conjunto de observações. Os pares de valores [*fluxo* (q), *densidade* (k)] obtidos em um cenário de simulação (um cenário apresenta fluxo variado, com porcentagem fixa de caminhões P_t , executado com uma semente i) são utilizados para se obter um polinômio de segundo grau, de formato similar ao proposto por Zhou et al. (2018), exceto pela inclusão de um intercepto c . O polinômio utilizado pode ser representado por:

$$k_{P_t,i}(q_{P_t,i}) = a \cdot q_{P_t,i}^2 + b \cdot q_{P_t,i} + c, \quad (5.2)$$

em que a , b e c são coeficientes ajustados através da regressão; $q_{P_t,i}$ são os volumes veiculares horários por faixa para cada intervalo de 15 minutos para cada par de sensores para uma porcentagem de caminhões P_t em uma semente i (veíc./h/faixa); e $k_{P_t,i}(q_{P_t,i})$ é a densidade por faixa para o respectivo volume horário $q_{P_t,i}$.

Os equivalentes veiculares são determinados para diferentes combinações de volumes veiculares horários versus porcentagem de caminhões. Para cada uma dessas combinações, determina-se a densidade da corrente mista para o volume veicular horário e para a porcentagem P_t

de caminhões desejados por meio da Equação 5.2. Depois, determina-se qual o volume veicular da corrente básica que resulta na mesma densidade obtida para a corrente mista, utilizando-se a Equação 5.2 com porcentagem de caminhões $P_t = 0$ (fluxo básico). Por fim, o equivalente veicular é determinado pela Equação:

$$PCE_{q_m, P_t, i} = \frac{1}{P_t} \left(\frac{q_b}{q_m} - 1 \right) + 1, \quad (5.3)$$

em que $PCE_{q_m, P_t, i}$ é o equivalente veicular calculado através do método de Huber (1982) para volume veicular horário misto igual a q_m e porcentagem de caminhões P_t a partir dos resultados da semente i ; e q_b é o volume veicular horário básico para o qual a densidade é igual à densidade em q_m .

5.2 Rede de simulação

Para criar as redes de simulação, foi definido um trecho padrão, que consiste em uma rodovia de pista dupla, de comprimento pouco maior que 7 km, sem curvas horizontais nem verticais, composta por três segmentos, mostrado na Figura 5.2. O primeiro segmento tem 3 km de comprimento, e possui declividade nula. Sua função é receber a corrente de tráfego e estabilizá-la antes de sua entrada no segundo segmento.

Figura 5.2: Esquema do trecho utilizado nas simulações.

Ao término do segmento de estabilização da corrente, inicia-se o segmento de coleta de dados, que possui 3 km de comprimento e possui declividade nula. Esse segmento apresenta sensores de tráfego que registram informações nos instantes em que cada veículo inicia e termina sua ocupação do sensor. Cada sensor opera em apenas uma faixa, logo foram instalados pares de sensores, um por faixa e lado a lado, sendo os pares de sensores localizados a cada 250 m, partindo da origem do segmento de coleta de dados. As informações fornecidas pelos sensores são: identificador do sensor, identificador do veículo ocupante, instantes de início e fim da ocupação, categoria veicular e velocidade instantânea.

Terminado o segmento de coleta, inicia-se um declive de inclinação igual a -4% e 1 km de comprimento. O segmento de saída tem por objetivo escoar os veículos até seu desaparecimento da simulação, de modo a evitar qualquer perturbação no tráfego que impacte os veículos que se encontram no segmento de coleta de dados.

Tabela 5.1: Proporção de cada categoria de caminhão no fluxo de caminhões

Categoria	Proporção (%)
Leves	39,60
Médios	27,10
Pesados	19,86
Extrapesados	13,44

5.2.1 Volumes de tráfego

Os veículos presentes na simulação pertencem a cinco categorias: uma referente aos carros, e quatro referentes a caminhões (leves, médios, pesados e extrapesados). A composição do fluxo de caminhões segue proporções constantes para cada categoria de caminhão. Esses valores foram obtidos a partir do relatório de uma balança rodoviária localizada no km 26 da rodovia SP255 para sete dias úteis, e são apresentados na Tabela 5.1.

O trecho rodoviário recebe volumes de tráfego, injetados de maneira estocástica, variando entre 1000 e 3000 veículos/hora a incrementos de 400 veículos/hora. Dessa maneira, a simulação apresenta seis intervalos de tempo. Para cada intervalo de tempo, um respectivo volume veicular é injetado de maneira constante por três horas. Em cada intervalo, a primeira hora tem por objetivo a estabilização da corrente de tráfego. Assim, os dados coletados pelos sensores nesse intervalo são descartados, e apenas os dados coletados nas duas horas subsequentes são utilizados.

5.2.2 Dados de entrada para o simulador calibrado

Diversas configurações padrão do Vissim devem ser modificadas para se obter dados simulados condizentes com cenários brasileiros. As quatro categorias de caminhões e suas respectivas funções de aceleração calibradas obtidas com o algoritmo genético na configuração de 105 gerações e 105 indivíduos por geração foram inseridas no simulador. Os limites da relação potência/massa foram alterados para 2,3 e 23,2 kW/t visto que as funções de aceleração foram calibradas para esse intervalo.

No Vissim, o desempenho dos caminhões depende, além das funções de aceleração, das distribuições de frequência acumulada de massa, potência e velocidade desejada. As distribuições de massa foram geradas a partir dos dados de 4.099 caminhões pesados nas balanças rodoviárias presentes no km 26 da SP255 entre os dias 15 e 23 de janeiro de 2018, como pode ser observado na Figura 5.3.

As distribuições de potência foram determinadas a partir dos dados obtidos em entrevista com os condutores dos caminhões, e são mostradas na Figura 5.4. As distribuições de velocidade desejada dos caminhões foram geradas com base no 90º percentil das velocidades para cada perfil de velocidade. A velocidade desejada para os carros foi obtida multiplicando-se

Figura 5.3: Distribuições de frequência acumulada de massa por categoria de caminhão.

Figura 5.4: Distribuições de frequência acumulada de potência por categoria de caminhão.

Figura 5.5: Distribuições de frequência acumulada de velocidade desejada por categoria veicular.

cada valor da distribuição padrão do Vissim para rodovias de 120 km/h pela razão (110/120), visto que a rodovia SP255 apresenta limite de velocidade igual a 110 km/h para carros. Pode-se observar as distribuições de velocidade resultantes na Figura 5.5.

Dentre os aspectos pertinentes à interação entre veículos, foram realizadas as seguintes modificações. Os comprimentos adotados para os caminhões em cada categoria foram: 7 m para caminhões leves; 10 m para caminhões médios; 15 m para caminhões pesados; e 19 m para caminhões extrapesados. Tais valores foram estipulados a partir dos comprimentos médios por categoria obtidos por Cunha, Modotti e Setti (2008). Foram adotados os parâmetros de

Tabela 5.2: Sementes utilizadas para cada iteração.

Sementes				
157	268	373	416	505
543	550	565	590	600
629	630	631	663	687
710	745	837	881	921

car-following e *lane-change* propostos por Bethonico, Piva e Setti (2016).

A rede de simulação descrita é simulada 18 vezes, variando-se a cada iteração a porcentagem de caminhões de 0 a 85% em relação ao fluxo veicular, a incrementos de 5%. Essas 18 simulações são repetidas 20 vezes, variando-se a semente utilizada para geração dos veículos. O conjunto de sementes foi obtido sorteando-se aleatoriamente 20 números únicos entre um e mil. As sementes utilizadas são exibidas na Tabela 5.2. Para fins de comparação essa rotina é executada duas vezes: uma utilizando a configuração original do Vissim, e outra modificando-se os parâmetros apresentados na Seção 5.2.2.

5.3 Extração e tratamento dos dados

Ao término da simulação, os dados provenientes dos sensores são agregados a intervalos de 15 minutos. Para cada intervalo, determinam-se a contagem dos veículos que passaram por cada sensor, a velocidade média instantânea por sensor, e a velocidade média no espaço por meio da equação (GERLOUGH; HUBER, 1975):

$$\bar{u}_s = \bar{u}_t - \frac{\sigma_t^2}{\bar{u}_t}, \quad (5.4)$$

em que $\bar{u}_s$ é a velocidade média no espaço; $\bar{u}_t$ é a velocidade média no tempo; e σ_t^2 é a variância da velocidade média no tempo.

Cada sensor coleta dados de apenas uma faixa de tráfego. Para se determinar o volume veicular horário para um dado intervalo de 15 minutos em um dado ponto da rodovia, somam-se as contagens de veículos do par de sensores do ponto para o intervalo e multiplica-se esse resultado por 4, visto que a contagem corresponde a 15 minutos (ou um quarto de hora), e divide-se esse resultado por dois, obtendo-se o volume veicular horário por faixa.

A velocidade média da corrente de tráfego em um ponto é obtida através da média ponderada das velocidades em cada faixa de tráfego, sendo que os fatores de ponderação são a contagem de veículos por faixa.

Obtém-se a densidade por faixa através da relação fundamental de tráfego $q = k \cdot \bar{u}_s$, em que q é o volume veicular horário por faixa (veíc./h/faixa); k é a densidade por faixa (veíc./km/faixa); e $\bar{u}_s$ é a velocidade média no espaço. Por fim, pode-se calcular os equivalentes através da abordagem exposta no item 5.1.

Figura 5.6: Equivalentes obtidos com o simulador calibrado em 20 simulações do trecho plano.

5.4 Resultados

Na Figura 5.6 é possível observar os equivalentes veiculares calculados a partir dos dados oriundos do simulador calibrado, para caminhões que trafegam em trecho plano. Para cada combinação entre porcentagem de caminhões e volume veicular, são apresentados os 20 equivalentes obtidos com as simulações de diferentes sementes, através dos pequenos quadrados coloridos. A escala de cores à direita do gráfico mostra o valor do PCE para a replicação.

A partir das médias expostas nas Figuras 5.7 e 5.8, pode-se afirmar que modificar as configurações do simulador resulta em valores de equivalentes veiculares significativamente diferentes. Nota-se que o intervalo de valores de equivalentes médios obtidos com o simulador calibrado não intercepta o intervalo do simulador não calibrado: a configuração calibrada retorna equivalentes entre 1,32 e 2,26, enquanto que a configuração original resulta em equivalentes entre 1,12 e 1,26. Logo, a configuração calibrada resulta em equivalentes mais altos para todas as respectivas combinações entre porcentagem de caminhões e volume veicular da configuração original. Esses valores indicam também que a configuração calibrada produz equivalentes mais sensíveis às variações da porcentagem de caminhões e do volume veicular: no cenário calibrado, os equivalentes são até 71,2% maiores que o equivalente mais baixo desse cenário (1,32), enquanto que essa mesma relação é de apenas 12,5% para o cenário não calibrado. Ao calcular a média para todos os equivalentes em cada configuração do simulador, tem-se 1,51 para o simulador calibrado e 1,16 para a configuração original, observando-se diferença de 0,35 entre os valores absolutos. A razão entre os equivalentes médios obtidos com a configuração calibrada e original ($\overline{PCE_{calib.}} / \overline{PCE_{orig.}}$) é igual a 1,30, isto é, o simulador calibrado resulta em equivalentes, em média, 30% maiores se comparados à configuração original.

Identifica-se através das Figuras 5.7 e 5.8 que, de modo geral, os equivalentes obtidos tanto para o simulador calibrado quanto não calibrado apresentaram comportamento consistente com outros trabalhos, verificando-se que os equivalentes variam de maneira inversamente proporcional à porcentagem de caminhões (WEBSTER; ELEFTERIADOU, 1999; DEMARCHI; SETTI, 2003; PIVA; SETTI, 2015), e de maneira diretamente proporcional ao volume veicular horário (WEBSTER; ELEFTERIADOU, 1999).

Figura 5.7: Média dos equivalentes obtidos com o simulador calibrado para caminhões em trecho plano.

Figura 5.8: Média dos equivalentes obtidos com o simulador não calibrado para caminhões em trecho plano.

Figura 5.9: Desvio padrão para equivalentes obtidos com o simulador calibrado para caminhões em trecho plano.

Figura 5.10: Desvio padrão para equivalentes obtidos com o simulador não calibrado para caminhões em trecho plano.

De modo geral, verifica-se que os valores dos equivalentes obtidos com o simulador calibrado tem pouca variação para cada combinação de porcentagem de caminhões versus volume veicular, com exceção dos valores obtidos para 5 e 10% de caminhões. Essa asserção é corroborada pela Figura 5.9, que mostra os valores de desvio padrão para cada combinação de volume e P_t .

Os valores de desvio padrão obtidos para o simulador na configuração original são exibidos na Figura 5.10. De modo similar ao observado para o simulador calibrado, os valores de desvio padrão para os equivalentes obtidos com o simulador na configuração original são maiores para as porcentagens mais baixas de caminhões. O módulo do desvio padrão em cada combinação nas configurações *default* é cerca de duas vezes o respectivo valor para a configuração calibrada. Uma possível explicação para esse fenômeno é que a frota de caminhões do simulador calibrado (4 categorias de caminhão, cada qual com desempenho, velocidade desejada e comprimento veicular diferente das demais), por ser significativamente mais heterogênea se comparada à classe de caminhões HGV *default* do Vissim, possibilita interações veiculares mais diversificadas que, por sua vez, aumentam a dispersão dos resultados agregados para a corrente de tráfego. Entretanto, para ambas as configurações do simulador, os desvios padrão dos equivalentes (Figuras 5.9 e 5.10) não ultrapassam 8% dos respectivos valores médios dos equivalentes (Figuras 5.7 e 5.8). Verifica-se, assim, que os equivalentes para cada combinação P_t versus volume tem pouca variabilidade nas 20 repetições do experimento tanto para o simulador calibrado quanto não calibrado. Portanto, a média dos equivalentes é uma medida apropriada visto que a dispersão dos equivalentes é pequena.

5.5 Considerações finais

Neste capítulo foi demonstrada a importância da calibração do simulador por meio de uma análise dos equivalentes veiculares para caminhões trafegando em trecho plano obtidos a partir de dados gerados com o simulador calibrado e não calibrado. Verificou-se que a calibração do simulador acarreta em equivalentes, em média, 30% maiores que os obtidos com o simulador não calibrado para as combinações das variáveis porcentagem de caminhões e volume veicular horário examinadas. Além disso, a correlação obtida dos equivalentes com essas mesmas variáveis é coerente com a literatura já estabelecida. No próximo capítulo, verifica-se que, em acíves, a calibração pode resultar em variações ainda maiores entre os equivalentes.

Equivalentes veiculares para caminhões em aclives

Neste capítulo, dá-se continuidade à avaliação dos equivalentes veiculares obtidos com diferentes configurações do simulador. A partir das premissas já estabelecidas no Capítulo 5, prossegue-se com a descrição das alterações necessárias na rede de simulação para estimar os equivalentes veiculares para caminhões trafegando em aclives com diversos valores de comprimento e declividade, obtidos com o Vissim calibrado e não calibrado.

6.1 Rede de simulação

Os trechos rodoviários utilizados para simulação dos aclives apresentam três segmentos, dos quais o segmento de estabilização da corrente e o segmento de saída da corrente de tráfego são idênticos aos utilizados para determinação dos equivalentes veiculares em regiões planas. As propriedades desses segmentos podem ser consultadas no item 5.2.

O segmento de coleta de dados apresenta comprimento e declividade variados. Os comprimentos possíveis variam entre 500 e 3000 metros, a intervalos de 500 metros, e declividades entre 1 a 8%, a intervalos de 1%. Para que todas as combinações de comprimento de aclive e declividade fossem simulados, foram necessários 48 trechos de rodovia, cada qual contendo um segmento de coleta com uma combinação única de comprimento e declividade. Optou-se por determinar os equivalentes veiculares com base no impacto dos caminhões na corrente de tráfego ao fim dos aclives, visto que os caminhões perdem velocidade à medida que se deslocam em aclives até atingir sua velocidade de equilíbrio. Portanto, cada segmento de coleta apresenta apenas dois sensores para coleta dos dados, posicionados lado a lado, um por faixa, ao final do aclive. A Figura 6.1 contém um esquema genérico para os trechos rodoviários utilizados.

Figura 6.1: Esquema dos trechos utilizados para simulação dos aclives.

A composição da corrente veicular e aumento progressivo dos volumes veiculares horários são idênticos aos utilizados nas simulações para trecho plano e podem ser consultadas no Item 5.2.1. Da mesma forma, todos os dados de entrada apresentados no capítulo anterior foram utilizados de forma idêntica ao exposto no item 5.2.2.

A rede de simulação contendo 48 trechos com aclives de diferentes propriedades é simulada 18 vezes variando-se a porcentagem de caminhões de forma igual à realizada no capítulo anterior. As 18 simulações são repetidas 20 vezes cada, sendo que cada replicação usa uma das sementes únicas indicadas na Tabela 5.2. Essa rotina é repetida duas vezes, sendo uma com a configuração original do Vissim, e outra utilizando-se o simulador calibrado (item 5.2.2).

6.2 Extração, tratamento dos dados e cálculo do equivalente veicular

A extração e tratamento dos dados segue as diretrizes expostas no item 5.3. Em contrapartida, as etapas para obtenção dos equivalentes veiculares foram modificadas e são apresentadas a seguir.

Os equivalentes veiculares são utilizados durante a análise de nível de serviço, servindo para conversão do fluxo veicular misto para fluxo básico, ambos em condições não congestionadas. Ao analisar graficamente a relação entre volume veicular horário e densidade para os dados simulados, observou-se, para alguns dos aclives, que a relação volume versus densidade apresenta dois comportamentos distintos: (i) parte dos dados apresenta conformação similar a uma parábola de segundo grau; e (ii) parte dos dados se encontra em uma nuvem de formato irregular, com valores de densidade significativamente maiores que os observados no primeiro grupo. Uma possível explicação para esse fenômeno é que os dados do segundo grupo pertencem a um fluxo congestionado, caracterizando nível de serviço F. Dessa forma, optou-se por limitar as análises subsequentes aos dados de tráfego não congestionado. Para isso, optou-se por excluir dados dos sensores cuja densidade é maior que 27 veículos/(km.faixa), considerando que esse valor representa o limite entre fluxo congestionado e não congestionado (ANDRADE, 2012). Na Figura 6.2 é possível observar um cenário de simulação em que os dados fluxo-densidade se dividem nos dois grupos mencionados.

Figura 6.2: Relação fluxo-densidade obtida com o simulador calibrado para alicve de 0,5 km e greide igual a 4%. As linhas representam as funções ajustadas para cada percentagem de caminhões na corrente de tráfego, adotando-se 27 veic/(km.faixa) como a densidade na capacidade.

Verificou-se, na análise dos resultados para o trecho plano no capítulo anterior, que há pouca variação entre os equivalentes obtidos com diferentes replicações para uma mesma combinação de parâmetros (percentagem de caminhões versus volume). Dessa forma, optou-se por utilizar os resultados combinados das 20 replicações para gerar as funções que representam a relação entre volume veicular horário e densidade para cada percentagem de caminhões, em cada alicve. Assim, essa relação pode ser representada pela função polinomial:

$$k_{P_t, g, l}(q_{P_t, g, l}) = a \cdot q_{P_t, g, l}^2 + b \cdot q_{P_t, g, l} + c, \quad (6.1)$$

em que $k_{P_t, g, l}$ é a densidade da corrente de tráfego com percentagem de caminhões P_t ao fim de um alicve de declividade g e comprimento l ; a, b e c são coeficientes ajustados através da regressão; e $q_{P_t, g, l}$ são os volumes horários para cada intervalo de 15 minutos.

Para cada segmento de alicve, os equivalentes veiculares são determinados para diferentes combinações de volume da corrente mista q_m e percentagem de caminhões P_t . Para cada uma dessas combinações, determina-se a densidade da corrente mista para $q_{P_t, g, l} = q_m$ e para P_t por meio da Equação 6.1. Depois, determina-se qual o volume veicular da corrente básica q_b que resulta na mesma densidade para a corrente mista, utilizando a Equação 6.1 com $P_t = 0$ (fluxo

básico) para o mesmo aclave. Por fim, o equivalente veicular é determinado pela equação:

$$PCE_{q_m, P_t, g, l} = \frac{1}{P_t} \left(\frac{q_b}{q_m} - 1 \right) + 1, \quad (6.2)$$

em que $PCE_{q_m, P_t, g, l}$ é valor do fator de equivalência, em carro-de-passeio equivalentes, para caminhões que trafegam em um aclave de rampa g e comprimento l ; e q_b é o volume horário numa corrente de tráfego composta apenas por automóveis, cuja densidade é igual à densidade observada na corrente formada por automóveis e caminhões quando o fluxo horário é q_m .

6.3 Resultados

As Figuras 6.3 e 6.4 apresentam os equivalentes obtidos para um mesmo aclave (greide de 4%, comprimento igual a 0,5 km), respectivamente com o simulador recalibrado e na configuração original. Nota-se que, na Figura 6.3, parte das combinações (porcentagem de caminhões versus volume veicular horário) não apresenta um valor de equivalente veicular. Isso significa que, nessas combinações, a densidade observada para a corrente mista é maior que 27 veíc./km.faixa, indicando um fluxo congestionado e, portanto, o equivalente para essas condições não é calculado. Em contrapartida, todas as combinações expostas na Figura 6.4 possuem valores de equivalentes, indicando que não há fluxo congestionado no greide. Em função dessa diferença, identificou-se, de maneira indireta, que ao menos parte das combinações de porcentagem de caminhões e volume veicular horário resultam em densidades maiores ao utilizar o simulador calibrado se comparadas ao simulador na configuração original. Esse comportamento pode também ser notado nos pares de Figuras 6.5–6.6 e 6.7–6.8 para greides de 1.500 m e 3.000 m, respectivamente.

As Figuras 6.9 e 6.10 apresentam, respectivamente, os equivalentes veiculares médios obtidos para cada configuração de aclave com o simulador calibrado e não calibrado. De forma similar ao observado para os trechos planos, os equivalentes veiculares para caminhões trafegando em aclives de diferentes configurações são, de maneira geral, maiores ao se utilizar o simulador calibrado se comparados aos equivalentes obtidos com o Vissim na configuração original. Em função da densidade limite para cálculo dos equivalentes, o simulador calibrado apresenta menos valores de equivalentes válidos do que o simulador não calibrado (combinações com nível de serviço F são mostradas em cinza nas Figuras 6.3 a 6.8). Logo, para permitir a comparação entre as médias provenientes das duas configurações do Vissim, optou-se por calcular as médias dos equivalentes para o simulador não calibrado utilizando apenas os equivalentes cujo correspondente no simulador calibrado fosse considerado válido (NS A a E). Por exemplo: para calcular as médias dos equivalentes para o aclave de 500 m greide igual a 4% (Figuras 6.3 e 6.4), para ambas as configurações do Vissim, os equivalentes para volume de 1300 veíc./h.faixa e P_t maior que 60% são descartados, bem como os equivalentes para volume de 1500 veíc./h.faixa e P_t maior que 25%.

Figura 6.3: Equivalentes obtidos com o simulador calibrado para aclave de 0,5 km e greide igual a 4%. Quadros em cinza correspondem a situações com fluxo congestionado (NS F).

Figura 6.4: Equivalentes obtidos com o simulador não calibrado para aclave de 0,5 km e greide igual a 4%.

Figura 6.5: Equivalentes obtidos com o simulador calibrado para aclave de 1,5 km e greide igual a 4%. Quadros em cinza correspondem a situações com fluxo congestionado (NS F).

Figura 6.6: Equivalentes obtidos com o simulador não calibrado para aclave de 1,5 km e greide igual a 4%. Quadros em cinza correspondem a situações com fluxo congestionado (NS F).

Figura 6.7: Equivalentes obtidos com o simulador calibrado para aclive de 3 km e greide igual a 4%. Quadros em cinza correspondem a situações com fluxo congestionado (NS F).

Figura 6.8: Equivalentes obtidos com o simulador não calibrado para aclive de 3 km e greide igual a 4%. Quadros em cinza correspondem a situações com fluxo congestionado (NS F).

As diferenças entre os valores médios dos equivalentes oriundos das configurações calibrada e não calibrada são apresentadas na Figura 6.11. Verifica-se, através da Figura 6.11, que todos os valores médios para os equivalentes com o simulador calibrado são maiores que os obtidos com o simulador não calibrado. Nota-se também que as menores diferenças se concentram nos aclives de greide igual a 1%, com valores entre 0,4 e 0,6. Esses valores são ligeiramente maiores que os observados para o trecho plano (0,35). Na Figura 6.12, em que se apresenta a razão entre os equivalentes médios obtidos com o simulador na configuração calibrada e original ($\overline{PCE_{calib.}} / \overline{PCE_{orig.}}$), identifica-se que, para greide igual a 1%, os equivalentes com o simulador calibrado são maiores em 30 a 40% que os obtidos com o simulador não calibrado, aproximando-se da diferença de 30% observada entre os equivalentes para o trecho plano.

As razões entre os equivalentes obtidos indicam que os equivalentes com o simulador calibrado são maiores que os equivalentes com a configuração original em 30% ou mais para todos os aclives de greide entre 1 e 5%. Em contrapartida, os valores abaixo de 1,3 são observados para os aclives de 6 a 8% de greide, localizados em aclives de 1500 a 3000 metros. Todavia, é esperado que existam poucas rampas longas com greide maior que 6% em rodovias de pista dupla, visto que essa é a inclinação máxima recomendada para esse tipo de via (IPR-DNER, 1999, p. 163). Assim, verifica-se que a calibração do simulador resulta em equivalentes veiculares significativamente diferentes dos obtidos com o simulador na configuração original para os aclives mais comuns em rodovias de pista dupla brasileiras.

Figura 6.9: Médias dos equivalentes obtidos com o simulador calibrado.

Figura 6.10: Médias dos equivalentes obtidos com o simulador não calibrado.

Figura 6.11: Diferenças entre as médias dos equivalentes obtidos com o simulador calibrado e não calibrado.

Figura 6.12: Razão entre as médias dos equivalentes obtidos com o simulador calibrado e não calibrado ($PCE_{calib.} / PCE_{orig.}$).

6.4 Considerações finais

Os equivalentes veiculares apresentados neste estudo de caso permitem demonstrar uma dentre diversas aplicações em estudos de tráfego nos quais a calibração do simulador acarreta em resultados significativamente diferentes dos observados com o simulador em suas configurações originais. A diferença nos resultados para aclives reitera a importância de se calibrar o modelo de desempenho de caminhões do simulador. Todos os equivalentes obtidos a partir do simulador calibrado podem ser consultados no Apêndice B. Os equivalentes calculados com os resultados do simulador não calibrado são disponibilizados no Apêndice C.

Considerações finais e recomendações

Neste trabalho, investigou-se a hipótese de pesquisa de que calibrar o modelo de desempenho de caminhões do Vissim resulta em menor erro entre perfis de velocidade reais e simulados se comparado aos resultados obtidos com a configuração original do modelo. A calibração do simulador foi obtida através de um algoritmo genético que buscou reduzir a diferença entre perfis de velocidade de caminhões reais e simulados.

Os perfis de velocidade foram obtidos a partir de dados de GPS coletados em 57 caminhões que trafegaram por uma rodovia com baixo fluxo de tráfego e relevo ondulado, formado por uma sequência de rampas longas e íngremes, praticamente sem curvas horizontais. Como os dados de GPS apresentam ruído, aplicou-se um filtro gaussiano aos valores brutos de velocidade. Determinou-se então a diretriz da rodovia por meio da obtenção das coordenadas de estacas equidistantes. Por fim, os dados de velocidade suavizados foram agregados nas estacas da diretriz da via, permitindo comparar as velocidades de diferentes veículos ao longo de um trecho padronizado.

A diretriz da rodovia foi então utilizada para se construir uma rede de simulação, na qual cada caminhão trafega individualmente. Cada caminhão simulado possui os mesmos valores de peso, potência e velocidade desejada de um caminhão real. Dessa forma, foi possível medir a diferença entre os perfis de velocidade real e simulado. Elaborou-se então um algoritmo genético que buscou as funções de aceleração que resultassem na menor diferença entre os perfis de velocidade. Os resultados obtidos indicam que as funções de aceleração calibradas reduzem significativamente a diferença entre a velocidade observada e a velocidade simulada. Verificou-se ainda que o tamanho da população e o número de gerações não provocam mudanças significativas na medida *fitness*.

Foram simuladas correntes de tráfego mistas (carros e caminhões) em trechos planos e em

rodovias com diversas composições de declividade e comprimento de rampa. Os dados obtidos foram então utilizados para se calcular equivalentes veiculares através do método adotado no HCM 2000 (WEBSTER; ELEFTERIADOU, 1999; TRB, 2000). O procedimento foi realizado com o Vissim na configuração original, e recalibrado para o estado de São Paulo, utilizando as funções de aceleração calibradas neste trabalho e os parâmetros de *car-following* e *lane-change* calibrados por Bethonico, Piva e Setti (2016). Identificou-se que os equivalentes obtidos com o simulador calibrado são, para cada configuração de rampa, maiores que os valores correspondentes obtidos com o simulador não calibrado para todos os cenários reproduzidos, sendo que as diferenças médias variam entre 20 e 120%. Logo, verifica-se que a recalibração do simulador provoca variação dos equivalentes veiculares para caminhões.

7.1 Conclusões

Neste trabalho, obtiveram-se as conclusões expostas a seguir:

1. A coleta de dados de velocidade ao longo de um trecho real de rodovia usando GPS foi capaz de fornecer os dados necessários para a calibração do modelo de desempenho do Vissim. Os perfis de velocidade de caminhões obtidos apresentam, simultaneamente, valores de velocidade desejada e de equilíbrio, necessários à calibração, respectivamente, das funções de aceleração desejada e máxima. Isso foi possível porque, por um lado, o baixo fluxo de tráfego observado no local de coleta permite aos condutores dos caminhões trafegar sem interações significativas com outros veículos, adotando velocidade de desejo nos trechos de baixa declividade ou em declives; e, por outro, o relevo ondulado possui rampas com greide e comprimento variados, permitindo-se identificar a velocidade de equilíbrio nesses locais.
2. O filtro gaussiano foi capaz de eliminar os ruídos associados à coleta de dados com GPS, dispensando tratamento manual dos dados, com exceção do veículo eliminado da amostra.
3. O uso de um algoritmo genético para calibrar automaticamente o modelo de desempenho veicular do Vissim teve sucesso, uma vez que o algoritmo identificou as configurações para as funções de aceleração que diminuem significativamente a diferença entre os perfis reais e simulados se comparados à configuração original do simulador. O algoritmo obteve resultados consistentes em suas replicações, pois verificou-se que o aumento do tamanho da população e número de gerações não provocou melhora significativa no *fitness* do modelo calibrado.
4. Há similaridade entre as funções de aceleração calibradas para diferentes categorias de caminhões, indicando que o uso de apenas uma configuração do modelo de desempenho

poderia explicar o deslocamento veicular para todos os caminhões usando uma categoria única.

5. Os fatores de equivalência para caminhões obtidos com o simulador calibrado são, de forma geral, significativamente maiores que os calculados com dados provenientes do simulador na configuração original. Esse fenômeno é esperado, visto que, ao calibrar o simulador para reprodução de caminhões brasileiros, cujo desempenho é inferior aos europeus, os caminhões simulados passam a causar maior impacto na corrente de tráfego e, assim, aumenta-se o fator de equivalência entre caminhões e carros de passeio.

7.2 Recomendações

Em função das atividades e resultados deste trabalho, indicam-se algumas recomendações para futuras pesquisas acadêmicas. Identificou-se que as funções de aceleração obtidas não possuem diferenças significativas entre cada categoria de caminhão. É possível que calibrar apenas uma única função de aceleração máxima e desejada para todos os caminhões simultaneamente (eliminando a classificação por número de eixos) possa resultar numa simplificação dessas funções, sem aumentar significativamente a diferença entre os perfis de velocidade simulados e reais.

Verificou-se que, apesar da maior parte dos equivalentes obtidos seguirem a tendência já observada na literatura, nota-se que, em alguns aclives, para fluxos de 500 veículos/hora/faixa, os equivalentes são maiores para valores intermediários de porcentagem de caminhões. Uma sugestão para trabalhos futuros é analisar o impacto do uso de diferentes funções para obtenção da relação fluxo-velocidade antes do cálculo dos equivalentes, visto que a função de segundo grau utilizada neste trabalho pode não ser a melhor representação do comportamento da densidade em função do fluxo para todos os cenários estudados.

Uma vez que os parâmetros do Vissim mais relevantes ao comportamento do tráfego rodoviário foram calibrados neste trabalho e no de Bethonico, Piva e Setti (2016) para rodovias brasileiras, o simulador calibrado pode ser utilizado para futuras pesquisas em âmbito nacional sem grandes alterações. Todavia, de modo a prosseguir com a avaliação dos equivalentes obtidos com o Vissim, recomenda-se obter equivalentes para outras configurações de rodovia além da básica, abrangendo trechos em *weaving* e *merging*. Destaca-se também o interesse em se obter equivalentes para relevos ondulados com rampas longas, visto que esse tipo de perfil longitudinal é predominante no Brasil.

Referências

- AASHTO. *A Policy on Geometric Design of Highway and Streets*. Washington, DC: American Association of Highway and Transportation Officials, 2001.
- ANDRADE, G. R.; SETTI, J. R. Diretrizes para a implantação de faixas adicionais em aclives de rodovias de pista dupla. In: ANPET. *Anais do XXIV Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes da ANPET*. Rio de Janeiro, RJ, 2010.
- ANDRADE, G. R. d. *Capacidade e relação fluxo-velocidade em autoestradas e rodovias de pista dupla paulistas*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, 2012.
- ARCHILLA, A.; CIEZA, A. D. Truck performance on Argentinean highways. *Transportation Research Record*, 1996. TRB, v. 1555, p. 114–123, 1996.
- BALAKRISHNA, R. et al. Calibration of microscopic traffic simulation models: Methods and application. *Transportation Research Record*, 2007. TRB, v. 1999, p. 198–207, 2007.
- BESTER, C. Truck speed profiles. *Transportation Research Record*, 2000. TRB, v. 1701, n. 14, p. 111–115, 2000.
- BETHONICO, F. C.; PIVA, F. J.; SETTI, J. R. Calibração de microsimuladores de tráfego através de medidas macroscópicas. In: ANPET. *Anais do XXX Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes da ANPET*. Rio de Janeiro, RJ, 2016.
- BURKE, E. et al. *Handbook of Metaheuristics*. Boston, MA: Springer US, 2003. 457–474 p. ISBN 978-0-306-48056-0.
- CARVALHO, L. G. S.; SETTI, J. R. Construção de perfis de velocidade de caminhões utilizando filtro gaussiano e regressões lineares em dados de GPS. In: ANPET. *Anais do XXXI Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes da ANPET*. Rio de Janeiro, RJ, 2017. p. 3341–3352.
- CARVALHO, L. G. S.; SETTI, J. R. Calibração do modelo de desempenho de caminhões do Vissim usando dados de GPS embarcado. In: ANPET. *Anais do XXXII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes da ANPET*. Rio de Janeiro, RJ, 2018. p. 3601–3612.

- CHU, L. et al. A calibration procedure for microscopic traffic simulation. In: *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems*. Shanghai, China: [s.n.], 2003. v. 2, p. 1574–1579.
- CIUFFO, B.; PUNZO, V. “No Free Lunch” theorems applied to the calibration of traffic simulation models. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2014. IEEE, v. 15, n. 2, p. 553–562, 2014.
- COUNSELMAN, C. C. Multipath-rejecting GPS antennas. *Proceedings of the IEEE*, 1999. IEEE, v. 87, n. 1, p. 86–91, 1999.
- CUNHA, A. L.; BESSA, J. E.; SETTI, J. R. Genetic algorithm for the calibration of vehicle performance models of microscopic traffic simulators. In: LOPES, L. S. et al. (Ed.). *Progress in Artificial Intelligence*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009. p. 3–14.
- CUNHA, A. L. B. N.; MODOTTI, M. de M.; SETTI, J. R. Classificação de caminhões através de agrupamento por análise de cluster. In: ANPET. *Anais do XXII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes da ANPET*. Rio de Janeiro, RJ, 2008. p. 1447–1459.
- DEMARCHI, S.; SETTI, J. Limitations of passenger-car equivalent derivation for traffic streams with more than one truck type. *Transportation Research Record*, 2003. v. 1852, p. 96–104, 2003.
- DEMARCHI, S. H.; MELO, R. A.; SETTI, J. R. Validação de um modelo de desempenho de caminhões em rampas ascendentes. *Transportes*, 2001. ANPET, v. 9, n. 1, p. 53–58, 2001.
- DENG, G.; CAHILL, L. An adaptive gaussian filter for noise reduction and edge detection. In: IEEE. *Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, IEEE Conference Record*. San Francisco, EUA, 1993. p. 1615–1619.
- DONNELL, E. et al. Speed prediction models for trucks on two-lane rural highways. *Transportation Research Record*, 2001. TRB, v. 1751, p. 44–55, 2001.
- EGAMI, C. Y.; SETTI, J. R.; RILLET, L. Algoritmo genético para calibração automática de um simulador de tráfego em rodovias de pista simples. *Transportes*, 2004. v. 12, n. 2, p. 5–14, 2004.
- ELEFTERIADOU, L.; TORBIC, D.; WEBSTER, N. Development of passenger car equivalents for freeways, two-lane highways, and arterials. *Transportation Research Record*, 1997. TRB, n. 1572, p. 51–58, 1997.
- GERLOUGH, D. L.; HUBER, M. J. *Traffic Flow Theory (Special Report; No. 165)*. Washington, DC: TRB, 1975. ISBN 0-309-02459-5. Disponível em: <<https://trid.trb.org/view/37152>>.
- HEERMANN, D. W. *Computer Simulation Methods in Theoretical Physics*. Berlin, Heidelberg: Springer, 1990. 8–12 p. ISBN 978-3-642-75448-7.
- HOURLAKIS, J.; MICHALOPOULOS, P.; KOTTOMMANNIL, J. Practical procedure for calibrating microscopic traffic simulation models. *Transportation Research Record*, 2003. TRB, v. 1852, p. 130–139, 2003.
- HUBER, M. F.; HANEBECK, U. D. Gaussian filter based on deterministic sampling for high quality nonlinear estimation. In: *17th World Congress of the International Federation of Automatic Control*. Seoul, South Korea: Elsevier, 2008. v. 41, p. 13527–13532.

- HUBER, M. J. Estimation of passenger-car equivalents of trucks in traffic stream. *Transportation Research Record*, 1982. TRB, n. 869, p. 60–70, 1982.
- IPR-DNER. *Manual de Projeto Geométrico de Rodovias Rurais*. Rio de Janeiro, RJ, 1999.
- JAYAKRISHNAN, R.; OH, J.-S.; SAHRAOUI, A.-E.-K. Calibration and path dynamics issues in microscopic simulation for advanced traffic management and information systems. *Transportation Research Record*, 2001. TRB, v. 1771, p. 9–17, 2001.
- JIE, L. et al. Calibration of a microscopic simulation model for emission calculation. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2013. Elsevier, v. 31, p. 172–184, 2013.
- JUN, J.; GUENSLER, R.; OGLE, J. Smoothing methods to minimize impact of global positioning system random error on travel distance, speed, and acceleration profile estimates. *Transportation Research Record*, 2006. TRB, v. 1972, p. 141–150, 2006.
- KIM, K.-O.; RILETT, L. R. Genetic-algorithm based approach for calibrating microscopic simulation models. In: *ITSC 2001. 2001 IEEE Intelligent Transportation Systems. Proceedings (Cat. No.01TH8585)*. Oakland, CA, USA: [s.n.], 2001. p. 698–704.
- KOTUSEVSKI, G.; HAWICK, K. A review of traffic simulation software. *Research Letters in the Information and Mathematical Sciences*, 2009. Massey University, v. 13, p. 35–54, 2009.
- KUMAR, M. et al. Genetic algorithm: Review and application. *International Journal of Information Technology and Knowledge Management*, 2010. v. 2, n. 2, p. 451–454, 2010.
- LI, J.; ZUYLEN, H. J. V.; XU, X. Driving type categorizing and microscopic simulation model calibration. *Transportation Research Record*, 2015. TRB, v. 2491, p. 53–60, 2015.
- LI, Y.; MCDONALD, M. Link travel time estimation using single GPS equipped probe vehicle. In: *Proceedings. The IEEE 5th International Conference on Intelligent Transportation Systems*. Singapura: [s.n.], 2002. p. 932–937.
- LIDBE, A. D.; HAINEN, A. M.; JONES, S. L. Comparative study of simulated annealing, tabu search, and the genetic algorithm for calibration of the microsimulation model. *Simulation*, 2017. v. 93, n. 1, p. 21–33, 2017.
- LIN, H.-C.; WANG, L.-L.; YANG, S.-N. Automatic determination of the spread parameter in gaussian smoothing. *Pattern Recognition Letters*, 1996. Elsevier, v. 17, n. 12, p. 1247–1252, 1996.
- MA, T.; ABDULHAI, B. Genetic algorithm-based combinatorial parametric optimization for the calibration of microscopic traffic simulation models. In: *ITSC 2001. 2001 IEEE Intelligent Transportation Systems. Proceedings (Cat. No.01TH8585)*. Oakland, CA, USA: IEEE, 2001. p. 848–853.
- MEDEIROS, A. L. et al. Calibração de redes viárias urbanas microssimuladas com o uso de algoritmos genéticos. In: ANPET. *Anais do XXVII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes da ANPET*. Rio de Janeiro, RJ, 2013.
- MELO, R. A.; SETTI, J. R. Faixas adicionais para aclives de rodovias de pistas simples brasileiras: uma adaptação dos critérios da AASHTO. *Transportes*, 2003. v. 11, n. 2, p. 41–48, 2003.

- MONICO, J. F. G. *Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações*. 2. ed. São Paulo, SP: Editora UNESP, 2007.
- OSMAN, I. H.; KELLY, J. P. (Ed.). *Meta-Heuristics*. Norwell, MA, USA: Kluwer Academic Publishers, 1996.
- PARK, B.; QI, H. Development and evaluation of a procedure for the calibration of simulation models. *Transportation Research Record*, 2005. TRB, v. 1934, p. 208–217, 2005.
- PIVA, F. J.; SETTI, J. R. Avaliação do impacto de veículos pesados na qualidade de serviço de rodovias de pista dupla usando dados empíricos. *Transportes*, 2015. v. 23, n. 4, p. 51–59, 2015.
- PTV AG. *PTV VISSIM 9 User Manual*. [S.l.], 2016.
- QUIROGA, C. A.; BULLOCK, D. Travel time studies with global positioning and geographic information systems: an integrated methodology. *Transportation Research Part C*, 1998. v. 6, p. 101–127, 1998.
- RAKHA, H. et al. Vehicle dynamics model for predicting maximum truck acceleration levels. *Journal of Transportation Engineering*, 2001. ASCE, v. 127, n. 5, p. 418–425, 2001.
- SALCEDO-SANZ, S. Modern meta-heuristics based on nonlinear physics processes: A review of models and design procedures. *Physics Reports*, 2016. Elsevier, v. 655, p. 1–70, 2016.
- SUMNER, R.; HILL, D.; SHAPIRO, S. Segment passenger car equivalent values for cost allocation on urban arterial roads. *Transportation Research Part A: General*, 1984. Elsevier, v. 18, n. 5-6, p. 399–406, 1984.
- TAUBIN, G. Curve and surface smoothing without shrinkage. In: IEEE. *Fifth International Conference on Computer Vision*. Cambridge, MA, EUA, 1995. p. 852–857.
- TETTAMANTI, T. et al. Iterative calibration of vissim simulator based on genetic algorithm. *Acta Technica Jaurinensis*, 2015. v. 8, n. 2, p. 145–152, 2015.
- TOLEDO, T. et al. Calibration of microscopic traffic simulation models with aggregate data. *Transportation Research Record*, 2004. TRB, v. 1876, p. 10–19, 2004.
- TRB. *Highway Capacity Manual 2000*. Washington, D.C., EUA, 2000.
- TRB. *Highway Capacity Manual 2010*. Washington, D.C., EUA, 2010.
- WALCK, C. *Handbook on statistical distributions for experimentalists*. Estocolmo, Suécia: University of Stockholm Internal Report SUF-PFY/96-01, 2007.
- WEBSTER, N.; ELEFTERIADOU, L. A simulation study of truck passenger car equivalents (PCE) on basic freeway sections. *Transportation Research Part B: Methodological*, 1999. Elsevier, v. 33, n. 5, p. 323–336, 1999.
- YANG, G. et al. Truck acceleration behavior study and acceleration lane length recommendations for metered on-ramps. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 2016. Elsevier, v. 5, n. 2, p. 93–102, 2016.
- YOUNG, I. T.; VLIET, L. J. V. Recursive implementation of the gaussian filter. *Signal processing*, 1995. Elsevier, v. 44, n. 2, p. 139–151, 1995.

ZHOU, J. et al. Estimating passenger car equivalents on level freeway segments experiencing high truck percentages and differential average speeds. *Transportation Research Record*, 2018. v. 2672, n. 15, p. 44–54, 2018.

Apêndices

APÊNDICE

Perfis de velocidade suavizados e simulados

A

Este apêndice contém os perfis de velocidade criados a partir de dados brutos e suavizados para os caminhões amostrados neste trabalho através das diretrizes expostas no Capítulo 3.

Figura A.1: Perfis de velocidade com dados brutos no Sentido Norte.

Figura A.2: Perfis de velocidade com dados brutos no Sentido Sul.

Figura A.3: Perfis de velocidade suavizados no Sentido Norte.

Figura A.4: Perfis de velocidade suavizados no Sentido Sul.

APÊNDICE

Tabelas dos equivalentes veiculares para caminhões utilizando o simulador calibrado

B

Neste apêndice são apresentados os equivalentes veiculares obtidos com o simulador calibrado para todas as combinações das seguintes variáveis: volume veicular horário (de 500 a 1500 veículos/hora/faixa, a intervalos de 200 veículos/hora/faixa); porcentagem de caminhões (de 5 a 85%, a intervalos de 5%); greide (de 0 a 8%, a intervalos de 1%); e comprimento do aclave (de 500 a 3000 m, a intervalos de 500 m, exceto para trechos planos). Os valores obtidos são expostos nas Tabelas B.1 a B.49, a seguir. Células indicadas com um traço indicam equivalentes que não foram calculados, uma vez que a densidade da corrente mista para esses pontos é maior que 27 veículos/km/faixa.

Tabela B.1: Equivalentes veiculares para caminhões em trecho plano.

Volume	Porcentagem de caminhões (%)																
(veíc./h/faixa)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
500	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3
700	1,4	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,3	1,3
900	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,3
1100	1,8	1,8	1,7	1,7	1,6	1,6	1,6	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
1300	2,0	1,9	1,8	1,8	1,7	1,7	1,6	1,6	1,6	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4	1,4	1,4
1500	2,3	2,0	1,9	1,8	1,8	1,7	1,7	1,6	1,6	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4	1,4

Tabela B.2: Equivalentes veiculares para caminhões em aclives de greide=1% e comprimento=500 m.

Volume	Porcentagem de caminhões (%)																
(veic./h/faixa)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
500	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,3
700	1,4	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
900	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
1100	1,8	1,8	1,7	1,7	1,7	1,7	1,6	1,6	1,6	1,6	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4
1300	2,0	2,0	1,9	1,8	1,8	1,8	1,7	1,7	1,6	1,6	1,6	1,6	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
1500	2,2	2,2	2,1	2,0	1,9	1,8	1,8	1,8	1,7	1,7	1,6	1,6	1,6	1,6	1,5	1,5	1,5

Tabela B.3: Equivalentes veiculares para caminhões em aclives de greide=1% e comprimento=1000 m.

Volume	Porcentagem de caminhões (%)																
(veíc./h/faixa)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
500	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,5	1,4	1,5	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
700	1,4	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
900	1,6	1,6	1,7	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4
1100	1,8	1,8	1,8	1,8	1,7	1,7	1,7	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
1300	2,0	2,0	2,0	1,9	1,9	1,8	1,8	1,7	1,7	1,7	1,7	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,5
1500	2,3	2,2	2,1	2,1	2,0	1,9	1,9	1,8	1,8	1,8	1,7	1,7	1,7	1,7	1,6	1,6	1,6

Tabela B.4: Equivalentes veiculares para caminhões em aclives de greide=1% e comprimento=1500 m.

Volume	Porcentagem de caminhões (%)																
(veíc./h/faixa)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
500	1,4	1,4	1,5	1,4	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
700	1,5	1,5	1,6	1,6	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4	1,4	1,4
900	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
1100	1,9	1,9	1,9	1,8	1,8	1,8	1,7	1,7	1,7	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,5	1,5
1300	2,2	2,1	2,0	2,0	1,9	1,9	1,8	1,8	1,8	1,7	1,7	1,7	1,7	1,6	1,6	1,6	1,6
1500	2,4	2,3	2,2	2,1	2,1	2,0	1,9	1,9	1,9	1,8	1,8	1,8	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7

Tabela B.5: Equivalentes veiculares para caminhões em aclives de greide=1% e comprimento=2000 m.

Volume	Porcentagem de caminhões (%)																
(veíc./h/faixa)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
500	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
700	1,5	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4
900	1,7	1,8	1,8	1,7	1,7	1,7	1,7	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,5	1,5	1,5	1,5
1100	2,0	2,0	1,9	1,9	1,9	1,8	1,8	1,8	1,7	1,7	1,7	1,7	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6
1300	2,3	2,2	2,1	2,1	2,0	1,9	1,9	1,9	1,8	1,8	1,8	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,6
1500	2,6	2,4	2,3	2,2	2,1	2,1	2,0	2,0	1,9	1,9	1,8	1,8	1,8	1,8	1,7	1,7	1,7

Tabela B.6: Equivalentes veiculares para caminhões em aclives de greide=1% e comprimento=2500 m.

Volume	Porcentagem de caminhões (%)																
(veic./h/faixa)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
500	1,5	1,5	1,6	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4	1,4	1,4
700	1,5	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
900	1,7	1,8	1,8	1,8	1,8	1,7	1,7	1,7	1,7	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,5	1,5
1100	2,0	2,0	2,0	2,0	1,9	1,9	1,8	1,8	1,8	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,6	1,6	1,6
1300	2,3	2,3	2,2	2,1	2,1	2,0	1,9	1,9	1,9	1,8	1,8	1,8	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7
1500	2,7	2,5	2,4	2,3	2,2	2,1	2,1	2,0	2,0	1,9	1,9	1,9	1,8	1,8	1,8	1,7	1,7

Tabela B.7: Equivalentes veiculares para caminhões em aclives de greide=1% e comprimento=3000 m.

Volume	Porcentagem de caminhões (%)																
(veíc./h/faixa)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
500	1,6	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4
700	1,5	1,6	1,6	1,7	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
900	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,7	1,7	1,7	1,7	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6
1100	2,1	2,1	2,1	2,0	1,9	1,9	1,9	1,8	1,8	1,8	1,8	1,7	1,7	1,7	1,7	1,6	1,6
1300	2,5	2,4	2,3	2,2	2,1	2,0	2,0	2,0	1,9	1,9	1,8	1,8	1,8	1,7	1,7	1,7	1,7
1500	2,9	2,7	2,5	2,3	2,2	2,2	2,1	2,1	2,0	2,0	1,9	1,9	1,8	1,8	1,8	1,8	1,7

Tabela B.8: Equivalentes veiculares para caminhões em aclives de greide=2% e comprimento=500 m.

Volume	Porcentagem de caminhões (%)																
(veíc./h/faixa)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
500	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4	1,5	1,4	1,4
700	1,5	1,5	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
900	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,5	1,5	1,5
1100	2,0	2,0	2,0	1,9	1,9	1,9	1,8	1,8	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,6	1,6	1,6	1,6
1300	2,3	2,3	2,2	2,1	2,1	2,0	2,0	1,9	1,9	1,9	1,8	1,8	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7
1500	2,7	2,6	2,4	2,3	2,2	2,2	2,1	2,1	2,1	2,0	1,9	1,9	1,8	1,8	1,8	1,8	1,7

Tabela B.9: Equivalentes veiculares para caminhões em aclives de greide=2% e comprimento=1000 m.

Volume	Porcentagem de caminhões (%)																
(veíc./h/faixa)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
500	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,5
700	1,6	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6
900	1,9	1,9	1,9	2,0	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,7	1,7	1,7
1100	2,3	2,3	2,3	2,2	2,2	2,1	2,1	2,1	2,0	2,0	2,0	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9
1300	2,8	2,7	2,6	2,5	2,4	2,4	2,3	2,3	2,2	2,2	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,0
1500	3,2	3,1	2,9	2,8	2,7	2,6	2,5	2,4	2,4	2,4	2,3	—	—	—	—	—	—

Tabela B.10: Equivalentes veiculares para caminhões em aclives de greide=2% e comprimento=1500 m.

[illegible]

Tabela B.11: Equivalentes veiculares para caminhões em aclives de greide=2% e comprimento=2000 m.

Volume	Porcentagem de caminhões (%)																
(veíc./h/faixa)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
500	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,7
700	1,8	1,9	2,0	2,1	2,1	2,1	2,1	2,0	2,0	2,0	2,0	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,8
900	2,3	2,4	2,5	2,5	2,4	2,4	2,3	2,3	2,2	2,2	2,2	2,1	2,1	2,1	2,0	2,0	2,0
1100	3,1	3,0	2,9	2,8	2,7	2,6	2,6	2,5	2,4	2,4	2,4	2,3	2,3	2,3	2,2	2,2	2,2
1300	3,9	3,6	3,3	3,2	3,0	2,9	2,8	2,7	2,6	2,6	2,6	2,5	—	—	—	—	—
1500	4,7	4,2	3,7	3,5	3,3	3,1	3,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Tabela B.12: Equivalentes veiculares para caminhões em aclives de greide=2% e comprimento=2500 m.

Volume	Porcentagem de caminhões (%)																
(veic./h/faixa)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
500	1,8	1,7	1,8	1,8	1,8	1,8	1,9	1,8	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,8	1,8	1,8
700	1,8	2,0	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,1	2,1	2,1	2,1	2,0	2,0	2,0	1,9
900	2,4	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,5	2,4	2,4	2,3	2,3	2,2	2,2	2,2	2,2	2,1	2,1
1100	3,3	3,2	3,1	3,0	2,9	2,8	2,7	2,6	2,6	2,5	2,5	2,4	2,4	2,3	2,3	2,2	2,2
1300	4,3	3,9	3,5	3,4	3,2	3,0	2,9	2,8	2,7	2,7	2,6	2,5	—	—	—	—	—
1500	5,3	4,5	4,0	3,7	3,4	3,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Tabela B.13: Equivalentes veiculares para caminhões em aclives de greide=2% e comprimento=3000 m.

Volume	Porcentagem de caminhões (%)																
(veíc./h/faixa)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
500	1,8	1,7	1,7	1,8	1,8	1,8	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,8	1,8
700	1,9	2,2	2,3	2,3	2,4	2,3	2,3	2,3	2,3	2,2	2,2	2,2	2,1	2,1	2,1	2,0	2,0
900	2,6	2,8	2,8	2,8	2,8	2,7	2,6	2,6	2,5	2,5	2,4	2,3	2,3	2,2	2,2	2,2	2,1
1100	3,5	3,4	3,3	3,1	3,1	2,9	2,8	2,8	2,7	2,6	2,5	2,5	2,4	2,4	2,3	2,3	2,2
1300	4,5	4,1	3,8	3,5	3,3	3,1	3,0	2,9	2,8	2,7	2,6	2,5	—	—	—	—	—
1500	5,5	4,7	4,2	3,7	3,5	3,3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Tabela B.14: Equivalentes veiculares para caminhões em aclives de greide=3% e comprimento=500 m.

Volume	Porcentagem de caminhões (%)																
(veíc./h/faixa)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
500	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6
700	1,6	1,6	1,7	1,7	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,6	1,6	1,6
900	1,9	1,9	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	1,9	1,9	1,9	1,9	1,8	1,8	1,8	1,7	1,7	1,7
1100	2,4	2,4	2,4	2,3	2,3	2,2	2,2	2,1	2,1	2,1	2,0	2,0	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9
1300	2,9	2,8	2,7	2,7	2,6	2,5	2,4	2,3	2,3	2,2	2,2	2,1	2,1	2,1	2,0	2,0	2,0
1500	3,5	3,3	3,1	3,0	2,8	2,7	2,6	2,5	2,4	2,4	—	—	—	—	—	—	—

Tabela B.19: Equivalentes veiculares para caminhões em aclives de greide=3% e comprimento=3000 m.

[illegible]

Tabela B.20: Equivalentes veiculares para caminhões em aclives de greide=4% e comprimento=500 m.

[illegible]

Tabela B.21: Equivalentes veiculares para caminhões em aclives de greide=4% e comprimento=1000 m.

[illegible]

Tabela B.22: Equivalentes veiculares para caminhões em aclives de greide=4% e comprimento=1500 m.

[illegible]

[illegible][illegible][illegible][illegible]

Volume	Porcentagem da amoilhão (%)
--------	-----------------------------

[illegible]

Volume	Porcentagem da comunidade (%)
--------	-------------------------------

[illegible]

Volume	Percentage of sample (n)
--------	--------------------------

[illegible]

Model	Percentage of correct classification (%)
-------	--

[illegible]

Tabela B.35: Equivalentes veiculares para caminhões em aclives de greide=6% e comprimento=2000 m.

[illegible]

Tabela B.36: Equivalentes veiculares para caminhões em aclives de greide=6% e comprimento=2500 m.

[illegible]

Tabela B.37: Equivalentes veiculares para caminhões em aclives de greide=6% e comprimento=3000 m.

[illegible]

Tabela B.38: Equivalentes veiculares para caminhões em aclives de greide=7% e comprimento=500 m.

[illegible]

[illegible][illegible][illegible][illegible]

Tabelas dos equivalentes veiculares para caminhões utilizando o simulador nas configurações originais

C

Neste apêndice são apresentados os equivalentes veiculares obtidos com o simulador na configuração original para todas as combinações das seguintes variáveis: volume veicular horário (de 500 a 1500 veículos/hora/faixa, a intervalos de 200 veículos/hora/faixa); porcentagem de caminhões (de 5 a 85%, a intervalos de 5%); greide (de 0 a 8%, a intervalos de 1%); e comprimento do aclave (de 500 a 3000 m, a intervalos de 500 m, exceto para trechos planos). Os valores obtidos são expostos nas Tabelas C.1 a C.49, a seguir. Células indicadas com um traço indicam equivalentes que não foram calculados, uma vez que a densidade da corrente mista para esses pontos é maior que 27 veículos/km/faixa.

Tabela C.1: Equivalentes veiculares para caminhões em trecho plano.

Volume	Porcentagem de caminhões (%)																
(veic./h/faixa)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
500	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
700	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
900	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
1100	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
1300	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
1500	1,3	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1

Tabela C.2: Equivalentes veiculares para caminhões em aclives de greide=1% e comprimento=500 m.

[illegible]

[illegible][illegible][illegible][illegible]

Tabela C.7: Equivalentes veiculares para caminhões em aclives de greide=1% e comprimento=3000 m.

Volume	Porcentagem de caminhões (%)																
(veíc./h/faixa)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
500	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
700	1,2	1,3	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
900	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
1100	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
1300	1,4	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
1500	1,4	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2

Tabela C.8: Equivalentes veiculares para caminhões em aclives de greide=2% e comprimento=500 m.

Volume	Porcentagem de caminhões (%)																
(veíc./h/faixa)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
500	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
700	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
900	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
1100	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
1300	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
1500	1,4	1,4	1,4	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2

Tabela C.9: Equivalentes veiculares para caminhões em aclives de greide=2% e comprimento=1000 m.

Volume	Porcentagem de caminhões (%)																
(veíc./h/faixa)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
500	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
700	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
900	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,2	1,2	1,2
1100	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3
1300	1,5	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3
1500	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3

Tabela C.10: Equivalentes veiculares para caminhões em aclives de greide=2% e comprimento=1500 m.

Volume	Porcentagem de caminhões (%)																
(veic./h/faixa)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
500	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3
700	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,2
900	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3
1100	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3
1300	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
1500	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4

Tabela C.11: Equivalentes veiculares para caminhões em aclives de greide=2% e comprimento=2000 m.

Volume	Porcentagem de caminhões (%)																
(veíc./h/faixa)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
500	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3
700	1,3	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3
900	1,4	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,3	1,3	1,3
1100	1,6	1,6	1,6	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
1300	1,7	1,7	1,7	1,6	1,6	1,6	1,6	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4	1,4
1500	1,8	1,8	1,7	1,7	1,7	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5

Tabela C.12: Equivalentes veiculares para caminhões em aclives de greide=2% e comprimento=2500 m.

Volume	Porcentagem de caminhões (%)																
(veíc./h/faixa)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
500	1,3	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
700	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,3
900	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
1100	1,7	1,7	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4	1,4
1300	1,8	1,8	1,8	1,8	1,7	1,7	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
1500	2,0	1,9	1,9	1,9	1,8	1,8	1,7	1,7	1,7	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,5	1,5	1,5

Tabela C.13: Equivalentes veiculares para caminhões em aclives de greide=2% e comprimento=3000 m.

Volume	Porcentagem de caminhões (%)																
(veíc./h/faixa)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
500	1,3	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
700	1,4	1,4	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
900	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4	1,4
1100	1,8	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,6	1,6	1,6	1,6	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
1300	2,0	1,9	1,9	1,8	1,8	1,8	1,7	1,7	1,7	1,6	1,6	1,6	1,6	1,5	1,5	1,5	1,5
1500	2,2	2,1	2,0	2,0	1,9	1,8	1,8	1,8	1,7	1,7	1,7	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,5

Tabela C.14: Equivalentes veiculares para caminhões em aclives de greide=3% e comprimento=500 m.

Volume	Porcentagem de caminhões (%)																
(veíc./h/faixa)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
500	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,2	1,2	1,2	1,2
700	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,2	1,2	1,2	1,2
900	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,2	1,2
1100	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3
1300	1,5	1,5	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3
1500	1,6	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3

Tabela C.15: Equivalentes veiculares para caminhões em aclives de greide=3% e comprimento=1000 m.

Volume	Porcentagem de caminhões (%)																
(veíc./h/faixa)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
500	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
700	1,4	1,4	1,4	1,5	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,3	1,3
900	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
1100	1,7	1,7	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4
1300	1,8	1,8	1,8	1,8	1,7	1,7	1,7	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,5	1,5	1,5	1,5
1500	2,0	2,0	1,9	1,9	1,8	1,8	1,8	1,7	1,7	1,7	1,7	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6

Tabela C.16: Equivalentes veiculares para caminhões em aclives de greide=3% e comprimento=1500 m.

Volume	Porcentagem de caminhões (%)																
(veíc./h/faixa)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
500	1,6	1,5	1,6	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
700	1,5	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
900	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6
1100	2,1	2,0	2,0	2,0	1,9	1,9	1,9	1,8	1,8	1,8	1,8	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,6
1300	2,4	2,3	2,2	2,2	2,1	2,1	2,0	2,0	1,9	1,9	1,9	1,8	1,8	1,8	1,8	1,7	1,7
1500	2,7	2,6	2,5	2,3	2,3	2,2	2,1	2,1	2,0	2,0	2,0	1,9	1,9	1,9	1,9	1,8	1,8

Tabela C.17: Equivalentes veiculares para caminhões em aclives de greide=3% e comprimento=2000 m.

Volume	Porcentagem de caminhões (%)																
(veíc./h/faixa)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
500	1,8	1,6	1,6	1,6	1,7	1,6	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,6	1,6	1,6	1,6
700	1,6	1,7	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7
900	2,0	2,0	2,1	2,1	2,0	2,0	2,0	2,0	1,9	1,9	1,9	1,9	1,8	1,8	1,8	1,7	1,7
1100	2,5	2,4	2,4	2,3	2,3	2,2	2,2	2,1	2,1	2,0	2,0	1,9	1,9	1,9	1,8	1,8	1,8
1300	3,0	2,9	2,7	2,6	2,5	2,4	2,3	2,2	2,2	2,1	2,1	2,0	2,0	1,9	1,9	1,9	1,8
1500	3,6	3,3	3,0	2,8	2,7	2,6	2,5	2,4	2,3	2,2	2,2	2,1	2,1	2,0	2,0	1,9	1,9

Tabela C.18: Equivalentes veiculares para caminhões em aclives de greide=3% e comprimento=2500 m.

Volume	Porcentagem de caminhões (%)																
(veic./h/faixa)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
500	1,8	1,7	1,6	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,7	1,7	1,7	1,7
700	1,7	1,9	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	1,9	1,9	1,9	1,9	1,8	1,8	1,8
900	2,2	2,3	2,4	2,3	2,3	2,3	2,2	2,2	2,1	2,1	2,1	2,0	2,0	1,9	1,9	1,9	1,8
1100	2,9	2,8	2,8	2,6	2,5	2,5	2,4	2,3	2,3	2,2	2,1	2,1	2,0	2,0	2,0	1,9	1,9
1300	3,7	3,3	3,1	2,9	2,8	2,7	2,5	2,4	2,4	2,3	2,2	2,1	2,1	2,0	2,0	1,9	1,9
1500	4,5	3,8	3,5	3,2	3,0	2,8	2,7	2,5	2,4	2,3	2,3	2,2	2,1	2,1	2,0	2,0	1,9

Tabela C.23: Equivalentes veiculares para caminhões em aclives de greide=4% e comprimento=2000 m.

Volume	Porcentagem de caminhões (%)																
(veíc./h/faixa)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
500	2,3	2,0	2,0	2,0	2,1	2,1	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,1	2,1	2,1	2,1
700	2,2	2,5	2,6	2,7	2,7	2,7	2,6	2,6	2,5	2,5	2,4	2,4	2,3	2,3	2,2	2,2	2,2
900	3,1	3,3	3,2	3,2	3,1	3,0	2,9	2,8	2,7	2,7	2,6	2,5	2,4	2,4	2,3	2,3	2,2
1100	4,3	4,1	3,8	3,6	3,4	3,3	3,1	3,0	2,9	2,7	2,6	2,6	2,5	2,4	2,3	2,3	2,2
1300	5,6	4,9	4,4	4,0	3,7	3,5	3,3	3,1	2,9	2,8	2,7	2,6	2,5	2,4	2,3	2,3	2,2
1500	7,0	5,7	4,9	4,3	3,9	3,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Tabela C.24: Equivalentes veiculares para caminhões em aclives de greide=4% e comprimento=2500 m.

Volume	Porcentagem de caminhões (%)																
(veíc./h/faixa)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
500	2,2	2,1	2,0	2,1	2,2	2,3	2,3	2,3	2,3	2,4	2,3	2,3	2,3	2,2	2,2	2,2	2,2
700	2,4	2,8	2,9	2,9	3,0	2,9	2,9	2,8	2,7	2,7	2,6	2,5	2,5	2,4	2,3	2,3	2,2
900	3,6	3,7	3,7	3,5	3,4	3,3	3,1	3,0	2,9	2,8	2,7	2,6	2,5	2,4	2,4	2,3	2,2
1100	5,1	4,6	4,2	3,9	3,7	3,5	3,3	3,1	3,0	2,8	2,7	2,6	2,5	2,4	2,4	2,3	2,2
1300	6,7	5,4	4,7	4,2	3,9	3,6	3,4	3,2	3,0	2,8	2,7	2,6	2,5	2,4	2,4	2,3	2,2
1500	8,3	6,2	5,2	4,5	4,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Tabela C.25: Equivalentes veiculares para caminhões em aclives de greide=4% e comprimento=3000 m.

Volume	Porcentagem de caminhões (%)																
(veic./h/faixa)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
500	2,1	2,1	2,1	2,2	2,3	2,4	2,4	2,5	2,4	2,5	2,5	2,4	2,4	2,3	2,3	2,3	2,2
700	2,7	3,0	3,1	3,2	3,1	3,1	3,0	2,9	2,8	2,8	2,7	2,6	2,5	2,4	2,4	2,3	2,3
900	4,0	3,9	3,9	3,8	3,5	3,4	3,2	3,1	3,0	2,9	2,7	2,6	2,6	2,5	2,4	2,3	2,3
1100	5,5	4,8	4,4	4,1	3,8	3,6	3,4	3,2	3,0	2,9	2,8	2,6	2,5	2,5	2,4	2,3	2,2
1300	7,1	5,7	4,9	4,4	4,0	3,7	3,4	3,2	3,0	2,9	2,7	2,6	2,5	2,4	2,4	2,3	2,2
1500	8,7	6,4	5,3	4,6	4,1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Tabela C.26: Equivalentes veiculares para caminhões em aclives de greide=5% e comprimento=500 m.

Volume	Porcentagem de caminhões (%)																
(veic./h/faixa)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
500	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4	1,5	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
700	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
900	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4	1,4
1100	1,8	1,8	1,8	1,8	1,7	1,7	1,7	1,7	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,5	1,5	1,5	1,5
1300	2,1	2,0	1,9	1,9	1,9	1,8	1,8	1,8	1,7	1,7	1,7	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6
1500	2,3	2,2	2,1	2,0	2,0	1,9	1,9	1,8	1,8	1,8	1,8	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,6

[illegible][illegible][illegible][illegible]

Tabela C.31: Equivalentes veiculares para caminhões em aclives de greide=5% e comprimento=3000 m.

[illegible]

Tabela C.32: Equivalentes veiculares para caminhões em aclives de greide=6% e comprimento=500 m.

Volume (veic./h/faixa)	Porcentagem de caminhões (%)																
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
500	1,6	1,6	1,7	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,5	1,5	1,5
700	1,6	1,6	1,7	1,7	1,7	1,7	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,5	1,5	1,5
900	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,6	1,6	1,6	1,6
1100	2,1	2,1	2,0	2,0	2,0	2,0	1,9	1,9	1,9	1,8	1,8	1,8	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7
1300	2,4	2,4	2,3	2,2	2,2	2,1	2,1	2,0	2,0	1,9	1,9	1,9	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8
1500	2,7	2,7	2,5	2,4	2,4	2,3	2,2	2,2	2,1	2,1	2,0	2,0	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9

Tabela C.33: Equivalentes veiculares para caminhões em aclives de greide=6% e comprimento=1000 m.

[illegible]

Tabela C.34: Equivalentes veiculares para caminhões em aclives de greide=6% e comprimento=1500 m.

[illegible]

Tabela C.35: Equivalentes veiculares para caminhões em aclives de greide=6% e comprimento=2000 m.

Volume	Porcentagem de caminhões (%)																
(veíc./h/faixa)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
500	2,9	2,8	3,1	3,2	3,3	3,3	3,3	3,3	3,2	3,1	3,1	3,0	2,9	2,9	2,8	2,7	2,7
700	4,5	4,6	4,5	4,4	4,2	4,0	3,8	3,7	3,5	3,4	3,3	3,2	3,0	2,9	2,8	2,7	2,7
900	6,5	5,9	5,3	5,0	4,6	4,3	4,0	3,8	3,6	3,4	3,3	3,2	3,0	2,9	2,8	2,7	2,6
1100	8,5	6,9	6,0	5,3	4,8	4,4	4,1	3,8	3,6	3,4	3,3	3,1	3,0	2,9	2,8	2,7	2,6
1300	10,4	7,7	6,4	5,6	4,9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1500	12,2	8,3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Tabela C.36: Equivalentes veiculares para caminhões em aclives de greide=6% e comprimento=2500 m.

Volume	Porcentagem de caminhões (%)																
(veíc./h/faixa)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
500	2,7	2,8	3,1	3,4	3,5	3,5	3,4	3,4	3,3	3,3	3,2	3,1	3,0	2,9	2,8	2,8	2,7
700	5,0	4,9	4,7	4,5	4,4	4,1	3,9	3,8	3,6	3,4	3,3	3,2	3,1	3,0	2,9	2,8	2,7
900	7,1	6,2	5,5	5,1	4,7	4,4	4,1	3,9	3,7	3,5	3,3	3,2	3,0	2,9	2,8	2,7	2,6
1100	9,1	7,2	6,1	5,4	4,9	4,5	4,1	3,9	3,6	3,4	3,3	3,1	3,0	2,9	2,8	2,7	2,6
1300	11,0	7,9	6,5	5,6	4,9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1500	12,6	8,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Tabela C.37: Equivalentes veiculares para caminhões em aclives de greide=6% e comprimento=3000 m.

Volume	Porcentagem de caminhões (%)																
(veíc./h/faixa)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
500	2,6	3,0	3,3	3,6	3,5	3,5	3,5	3,5	3,4	3,3	3,2	3,1	3,0	2,9	2,9	2,8	2,7
700	5,3	5,1	4,9	4,7	4,4	4,2	4,0	3,8	3,6	3,5	3,3	3,2	3,1	3,0	2,9	2,8	2,7
900	7,6	6,4	5,7	5,2	4,8	4,5	4,2	3,9	3,7	3,5	3,3	3,2	3,0	2,9	2,8	2,7	2,6
1100	9,6	7,3	6,2	5,5	4,9	4,5	4,2	3,9	3,6	3,4	3,3	3,1	3,0	2,9	2,8	2,7	2,6
1300	11,2	8,0	6,5	5,6	5,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1500	12,7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Tabela C.38: Equivalentes veiculares para caminhões em aclives de greide=7% e comprimento=500 m.

Volume	Porcentagem de caminhões (%)																
(veíc./h/faixa)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
500	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7
700	1,8	1,8	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,7	1,7	1,7	1,7
900	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	1,9	1,9	1,9	1,9	1,8	1,8	1,8
1100	2,5	2,5	2,4	2,4	2,4	2,3	2,3	2,2	2,2	2,1	2,1	2,1	2,0	2,0	2,0	1,9	1,9
1300	3,0	2,9	2,8	2,7	2,7	2,6	2,5	2,4	2,3	2,3	2,2	2,2	2,2	2,1	2,1	2,1	2,0
1500	3,5	3,3	3,1	3,0	2,9	2,8	2,7	2,6	2,5	2,4	2,4	—	—	—	—	—	—

Tabela C.39: Equivalentes veiculares para caminhões em aclives de greide=7% e comprimento=1000 m.

[illegible]

Tabela C.40: Equivalentes veiculares para caminhões em aclives de greide=7% e comprimento=1500 m.

[illegible]

Tabela C.41: Equivalentes veiculares para caminhões em aclives de greide=7% e comprimento=2000 m.

[illegible]

Tabela C.42: Equivalentes veiculares para caminhões em aclives de greide=7% e comprimento=2500 m.

[illegible]

[illegible][illegible][illegible][illegible]

Tabela C.47: Equivalentes veiculares para caminhões em aclives de greide=8% e comprimento=2000 m.

[illegible]

Tabela C.48: Equivalentes veiculares para caminhões em aclives de greide=8% e comprimento=2500 m.

[illegible]

Tabela C.49: Equivalentes veiculares para caminhões em aclives de greide=8% e comprimento=3000 m.

[illegible]