

AVALIAÇÃO DO IMPACTO DA VELOCIDADE REGULAMENTAR NO DESEMPENHO OPERACIONAL DO ANEL RODOVIÁRIO DE BELO HORIZONTE

Rafael Quintão de Andrade
André Augusto Cunha Libânio

José Elievam Bessa Júnior
Universidade Federal de Minas Gerais
Curso de Mestrado em Geotecnia e Transportes

Rodrigo Sírio Coelho
Fratat Engenharia Consultiva

RESUMO

Este trabalho teve, como objetivo geral, avaliar os impactos operacionais da variação da velocidade regulamentar do Anel Rodoviário de Belo Horizonte, que se caracteriza como um importante corredor rodoviário e urbano da cidade. Com esse objetivo, utilizou-se o microssimulador de tráfego Aimsun Next para a análise de diferentes cenários de configuração do sistema viário, criando um ambiente de suporte técnico para a tomada de decisão nas áreas de planejamento urbano e controle operacional do tráfego. Foram analisados indicadores de desempenho, tais como densidade, velocidade média, tempo de viagem, atraso e filas médias. A análise dos indicadores operacionais resultantes da simulação mostrou que a velocidade regulamentar de 70 km/h apresentou tempo de viagem e fila média mais equilibrados. Velocidades regulamentares superiores implicaram em um aumento dos indicadores de fila e da velocidade média operacional, enquanto os cenários de redução da velocidade regulamentar apresentaram tempos médios de viagem mais elevados, com índices de fila média equivalentes ou superiores.

1. INTRODUÇÃO

O Anel Rodoviário de Belo Horizonte (ARBH) é uma importante via de ligação de um conjunto de rodovias federais, com um papel fundamental para toda a Região Metropolitana de Belo Horizonte. Construído com a finalidade de preservar o centro urbano da capital mineira do atravessamento pelo tráfego rodoviário de longa distância, o ARBH, há muito, foi envolvido pela mancha urbana e passou a exercer, também, um papel estruturador no território da cidade ao permitir, também, uma série de interligações entre suas regiões.

O incremento da demanda no ARBH não foi acompanhado, proporcionalmente, pelo aumento da infraestrutura da rodovia. A escassez de investimentos resultou em implantações parciais de soluções viárias, evidenciadas pela descontinuidade das pistas marginais e estreitamentos das pistas centrais nas interseções do ARBH com os corredores radiais que o interceptam. Além disso, as restrições impostas pela ocupação do solo lindeiro dificultam a implantação de soluções para melhoria da articulação do ARBH com esses eixos viários. A combinação de demandas com tão distintas características em um corredor incapaz de atendê-las de forma apropriadamente segregada tem como consequência a ocorrência de congestionamentos e acidentes.

Com relação à gravidade dos acidentes, entre 2012 e 2016, foram registrados no ARBH, em média, 122 vítimas em estado grave e 35 óbitos por ano (Tabela 1). Na literatura, existem alguns estudos que relacionam os efeitos da variação da velocidade sobre os indicadores de gravidade e do número de acidentes (Haddon, 1972; Ewing, 2009). Para Ewing (2009), no entanto, não se pode atribuir exclusivamente à velocidade a causa dos acidentes, pois sua incidência provém de uma relação entre diversos fatores, como diferenciais de velocidade entre os veículos no fluxo de tráfego, volume e movimentos conflitantes.

Um exemplo dessa discussão diz respeito às recentes mudanças da velocidade regulamentar das marginais Pinheiros e Tietê, em São Paulo, promovidas pela Companhia de Engenharia de Tráfego (CET-SP). Em julho de 2015, as velocidades máximas permitidas foram reduzidas de 90

km/h para 70 km/h na pista expressa, de 70 km/h para 60 km/h nas pistas centrais e de 60 km/h para 50 km/h nas pistas locais, sob a justificativa de melhoria da segurança viária. De fato, o número e a gravidade dos acidentes reduziram consideravelmente após a implantação das medidas de redução da velocidade nas marginais (Sarno, 2016).

Tabela 1: Vítimas de acidentes em estado grave ou fatal no ARBH

Ano	Vítimas Graves	Vítimas Fatais
2012	126	39
2013	113	41
2014	144	36
2015	108	26
2016	121	35

Fonte: CINDS (2013, 2014, 2015, 2016) e Governo do Estado de Minas Gerais (2017)

Nesse sentido, visando explorar de forma técnica e objetiva esse tema, propõe-se, no presente estudo, avaliar o impacto da variação da velocidade regulamentar no desempenho operacional do ARBH. Para tanto, a simulação de tráfego, por meio do software Aimsun Next, foi usada como ferramenta de auxílio à tomada de decisão.

2. MACROSSIMULAÇÃO

O Aimsun Next é um dos simuladores de tráfego mais reconhecidos no mundo, sendo capaz de reproduzir o comportamento do tráfego em uma rede viária. Como grande diferencial, o software incorpora, em uma mesma plataforma, diferentes abordagens da simulação de tráfego: macro, meso e microscópicos. Neste estudo, foram realizadas simulações macro e microscópicas. Os modelos macroscópicos simulam o comportamento agregado do tráfego, pressupondo que a corrente de tráfego é formada por veículos e condutores com características semelhantes.

A primeira etapa da modelagem compreende a abordagem macroscópica e tem o propósito de avaliar o comportamento agregado do tráfego na Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH). Essa simulação reproduz a escolha das rotas percorridas pelos veículos em toda RMBH, visando identificar e caracterizar as viagens que passam pelo ARBH com suas respectivas características físico-operacionais da malha viária. A demanda de tráfego foi modelada a partir da Matriz Origem-Destino da região metropolitana, desenvolvida pela Agência de Desenvolvimento da RMBH, em 2012. Para ajustar e atualizar os volumes de tráfego, foram utilizadas contagens classificadas de veículos (304, no total) no pico da tarde (das 17 h às 18 h), distribuídas ao longo do ARBH. Estas pesquisas foram obtidas junto aos estudos de tráfego da Tectran (2017) e Consórcio CGP - CEPROL - AFIRMA (2014).

O processo de ajuste dos volumes de tráfego utilizou a ferramenta de Ajuste de Matriz OD Estática. Essa ferramenta consiste em um algoritmo que associa, iterativamente, os resultados da alocação (caminhos e fluxos) às contagens de tráfego, identificando alterações na matriz OD que proporcionem melhores ajustes ao modelo. Como parâmetros desse procedimento, utilizou-se, no máximo, 5 iterações e valores de elasticidade da matriz original de 0,60 e elasticidade do comprimento de viagem de 0,40. Estas elasticidades indicam o quanto o modelo é suscetível a alterar as demandas de viagens para atingir melhores indicadores de ajuste. Elasticidades próximas de zero indicam que os valores das matrizes originais ficarão praticamente inalterados, enquanto elasticidades próximas de 1,0 proporcionam maior liberdade ao modelo, sendo

aplicada praticamente nenhuma restrição aos ajustes das viagens para corresponder às contagens observadas (elasticidade da matriz) ou à distribuição do comprimento de viagem (TSS, 2018).

Para escolha dos parâmetros de ajuste, considerou-se o tamanho da área de estudo e o tempo de defasagem da matriz original de 5 anos em relação ao ano da pesquisa Origem e Destino (2012) e a data de realização das contagens de tráfego (2017), ano base deste estudo. Quanto ao modelo de alocação, foi empregada a Alocação por Equilíbrio, com *gap* relativo de convergência de 1% e número máximo de iterações de 200.

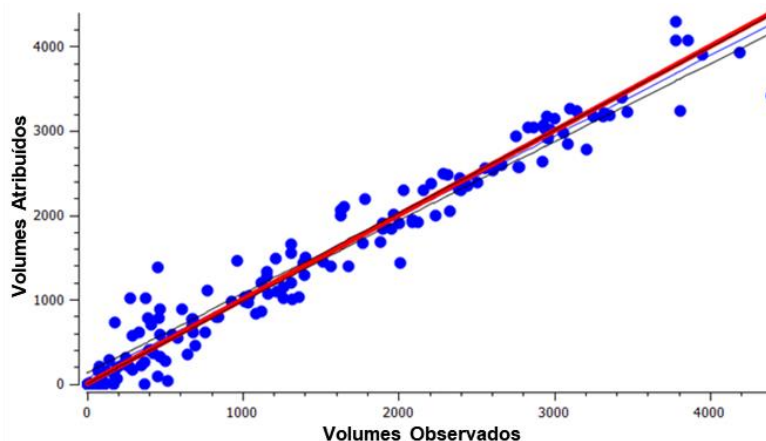


Figura 1: Regressão linear dos volumes atribuídos *versus* observados

Na Figura 1, é possível comparar os volumes atribuídos na simulação com os valores observados durante as contagens de tráfego, em que a reta vermelha representa a alocação de tráfego ideal, quando os valores observados e atribuídos são coincidentes. A reta azul, por sua vez, indica os resultados obtidos da regressão linear que comparam estes dois conjuntos de dados. O coeficiente de ajuste linear (fator R^2) obtido foi de 95%, o que indica um resultado satisfatório de ajuste da matriz OD. Além disso, o coeficiente linear da reta de regressão (em azul, na figura) foi de 0,99, o que indica desvio de apenas 1% entre os volumes atribuídos e observados.

Uma vez ajustada a rede macroscópica, o próximo passo consiste na microsimulação da sub-rede que delimita a área de estudo. Por meio da ferramenta de atravessamento de tráfego, realizou-se um “recorte” na malha viária, a partir do qual obtém-se uma nova configuração de rede, novos centroides (458, no total) internos ou externos (nos acessos) e as matrizes OD resultantes, contemplando os fluxos internos e de atravessamento da subrede. A Figura 2 mostra a área de estudo, abrangendo toda a extensão do ARBH, com destaque para as interseções com as principais vias de acesso (avenidas Waldir Soeiro Emrich, Amazonas, Dom Pedro II, Presidente Carlos Luz, Antônio Carlos, Cristiano Machado e as rodovias BR-040 e BR-356).

Adicionalmente às características básicas presentes na rede macroscópica, como número de faixas e velocidade regulamentar, é necessário detalhar a geometria da via (aclives/declives, raios de curva, faixas de aceleração/desaceleração etc.), as características de dispositivos de controle semafórico (ciclos, estágios e defasagens), as informações relativas ao transporte público (itinerários, frequência e localização de pontos de embarque e desembarque), entre outros. Os dados de transporte público e de programação semafórica foram obtidos junto à BHTrans, autarquia municipal pelo gerenciamento de transportes e trânsito de Belo Horizonte.

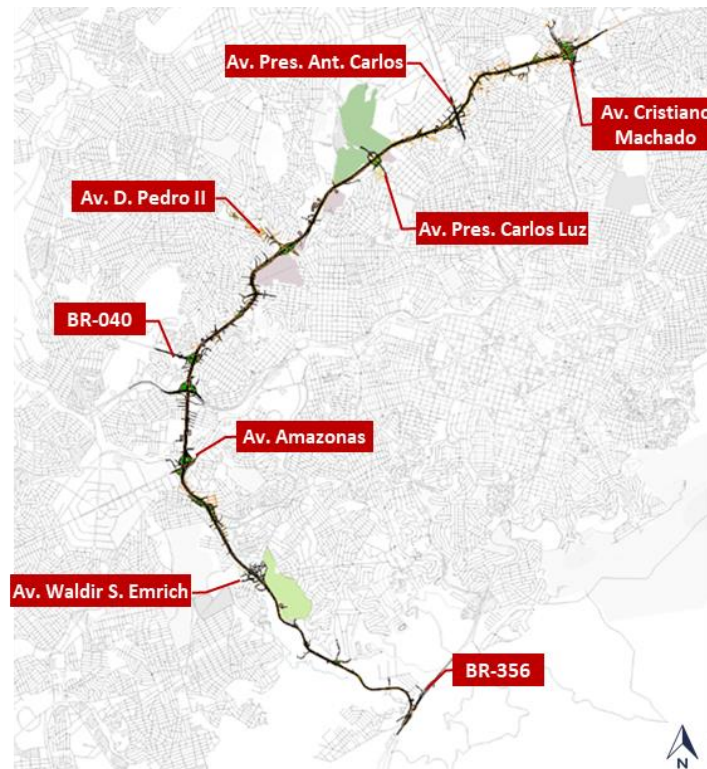


Figura 2: Delimitação da área de estudo

A Figura 3 mostra o mapa de carregamento da rede de macrossimulação. Nesse mapa, a cor indica o grau de saturação (relação entre volume e capacidade, V/C) e a espessura refere-se ao volume de tráfego em cada trecho. Notadamente, o ARBH apresenta alguns trechos nos quais a demanda excede sua capacidade teórica. O reflexo disso consiste na formação de congestionamentos diários que impactam na fluidez do tráfego na via. Algumas características presentes no ARBH, no entanto, como supressão de faixas e áreas de entrelaçamento, convergência e divergência de fluxos, impactam diretamente na operação da via, mas seus efeitos não são captados adequadamente pelo modelo macroscópico. Tais impedâncias são mais bem compreendidos e representados nas simulações microscópicas, apresentada a seguir.

3. MICROSSIMULAÇÃO

Os modelos de microsimulação de tráfego simulam a conduta individual de cada motorista, de forma contínua, adotando distribuições probabilísticas que representam as variações do comportamento dos motoristas e dos diferentes tipos de veículos com suas peculiaridades, como potência, peso, capacidade de aceleração, entre outros. Os modelos microscópicos simulam os movimentos dos veículos individualmente baseados, principalmente, em três submodelos comportamentais: *car-following*, *lane-changing* e *gap-acceptance* (TSS, 2018).

A partir da alocação de tráfego descrita na seção anterior, foram realizados os experimentos de microsimulação, nos quais alteraram-se as velocidades máximas das pistas centrais e marginais do ARBH. A velocidade regulamentar utilizada para as pistas centrais foi de 70 km/h, enquanto, para as pistas marginais, foi de 60 km/h. Nos experimentos realizados, as velocidades regulamentares foram alteradas em até 20 km/h, acima e abaixo dos limites estabelecidos, em passos de 10 km/h. A diferença entre as velocidades das pistas centrais e marginais foram mantidas em 10 km/h.



Figura 3: Carregamento da rede de macro-simulação

Para cada cenário, foram simuladas 5 replicações, com sementes de número aleatório distintas. A definição do número de replicações levou-se em consideração o elevado tempo de processamento em função da complexidade da rede de tráfego e limitações do uso de hardware e software. O estado de tráfego inicial da simulação foi obtido a partir de um tempo de aquecimento (*Warm-Up*) de 1 hora, com demanda de tráfego equivalente a 80% da hora pico, valor adotado com o objetivo de representar o comportamento do tráfego nas horas que antecedem o período de simulação. A calibração e validação dos parâmetros dos submodelos comportamentais foram realizados em trabalhos anteriores (Magalhães et al., 2017; Souza, 2019). Não houve necessidade de mudar os parâmetros *default* de escolha de rota, por se tratar de um estudo de corredor de tráfego, onde há pouca interferência

3.1. Indicadores de desempenho

Os principais indicadores de desempenho obtidos das micro-simulações e considerados neste estudo são:

- Velocidade Média: indica a razão entre a distância total percorrida (em km) pelo tempo total de viagem (em horas) dos veículos na rede.
- Tempo de Viagem Médio: representa o tempo médio gasto no seu deslocamento;
- Densidade: reflete a quantidade de veículos por unidade de extensão de rede;
- Atraso Médio: indica a diferença entre o tempo de viagem em fluxo livre e o tempo efetivamente gasto na simulação;
- Fila Média: refere-se à quantidade média de veículos em fila na rede. São considerados em fila os veículos parados ou em velocidade inferior a 1 m/s; esses veículos deixam de ser contabilizados quando ultrapassam 4 m/s.

Especificamente em relação à velocidade média, optou-se pela fórmula descrita acima em

detrimento das médias harmônicas das velocidades, indicador bastante usual em estudos de simulação, para que os resultados reflitam de forma mais efetiva o comportamento do tráfego no ARBH, de forma a reduzir os impactos dos fluxos que o transpõem. Na média harmônica, cada veículo possui o mesmo peso, independente do comprimento de seu percurso na rede simulada. Ao considerar a razão entre distância e tempo de viagem da rede, o comprimento de viagem se torna um peso de ponderação para o cálculo do indicador.

3.2. Análise dos Resultados

Na Figura 4, são apresentados os principais indicadores de desempenho (IDs) extraídos das microsimulações para cada cenário de velocidade regulamentar das pistas centrais. As variações (ΔID_{70}) em relação ao cenário base (70 km/h) são exibidas abaixo das curvas dos respectivos indicadores.

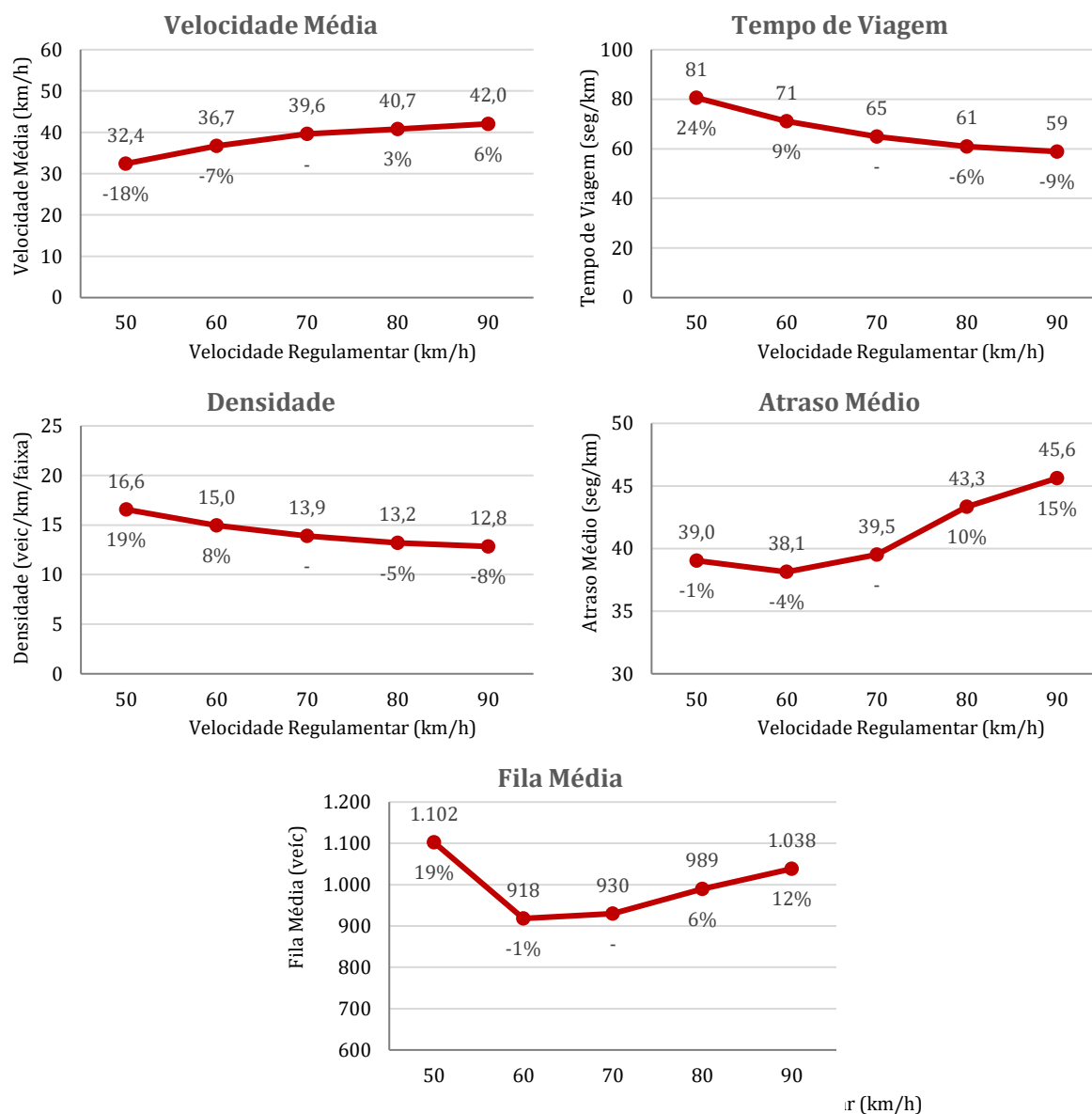


Figura 4: Indicadores de desempenho em função da velocidade regulamentar do ARBH

A diminuição da velocidade regulamentar do corredor resultou em reduções na velocidade média de 7% e 18% para os cenários de 60 km/h e 50 km/h, respectivamente. Quando testadas

velocidades regulamentares superiores ao cenário base, as variações na velocidade média do sistema foram menos expressivas, aumentando apenas 3% para o cenário com 80 km/h e 6% para o de 90 km/h. A variação das velocidades médias, portanto, não se comporta de forma linear à variação das velocidades regulamentares no ARBH. Efeitos inversos foram observados com a densidade e o tempo médio de viagem, em que se verificou uma redução à medida que se aumentou a velocidade regulamentar da via. Não houve, no entanto, ganho expressivo de redução de tempos de viagem proporcionados pelo aumento da velocidade regulamentar na via.

Em relação ao atraso médio, verificou-se uma variação de -1% a -4% nos cenários com redução da velocidade regulamentar. Ao considerar o aumento do limite de velocidade da via, constataram-se aumentos significativos do tempo de atraso, de 10% a 15%, devido principalmente à estagnação da velocidade média operacional da ARBH. É importante destacar que os atrasos são calculados a partir da diferença entre o tempo de viagem de fluxo livre (medido a partir da velocidade regulamentar) e tempo de viagem simulado, a partir das velocidades obtidas na simulação. As filas médias extraídas das microssimulações demonstram que os cenários com 60 km/h e 70 km/h são os que apresentam menores níveis de congestionamento. Merece destaque o substancial aumento da fila média quando a velocidade regulamentar do ARBH é reduzida para 50 km/h. Na Tabela 2, são detalhados os indicadores de desempenho obtidos na simulação para cada cenário, com os valores médios e de desvio padrão das replicações.

Tabela 2: Resumo dos indicadores de desempenho da simulação

Indicador de Desempenho	Cenários (Velocidade Regulamentar)									
	50 km/h		60 km/h		70 km/h		80 km/h		90 km/h	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
Velocidade Média (km/h)	32,4	0,2	36,7	0,2	39,6	0,3	40,7	0,2	42,0	0,2
Densidade (veic/km)	16,6	0,2	15,0	0,3	13,9	0,2	13,2	0,3	12,8	0,3
Fila Média (veic)	1.102	74,8	918	69,9	930	61,7	989	86,0	1.038	72,9
Atraso Médio (s/km)	37	0,9	33	1,4	33	2,1	35	1,3	36	0,9
Tempo de Viagem (s/km)	81	0,9	71	1,4	65	2,1	61	1,3	59	0,9

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho se propôs a avaliar os impactos operacionais decorrentes da alteração da velocidade regulamentar no ARBH. Para tanto, contou-se com o apoio de microssimulação de tráfego, que incorpora modelos de comportamento de veículos e motoristas, permitindo extrair indicadores que auxiliam na tomada de decisão. As simulações demonstraram que, em termos gerais, a adoção de velocidade regulamentar de 70 km/h apresenta melhores indicadores de desempenho do ARBH. Essa alternativa apresenta redução de 9% do tempo de viagem em relação ao cenário de 60 km/h, mesmo apresentando níveis de fila média bem próximos deste cenário. Além disso, a aplicação de velocidades regulamentares superiores não se mostrou interessante, devido principalmente à estabilização da velocidade média da rede e ao aumento da fila média.

Uma limitação do modelo de simulação construído refere-se à demanda de tráfego da rede. Neste trabalho, os cenários foram avaliados sob as mesmas matrizes origem e destino de veículos. No entanto, alterar a velocidade regulamentar de uma via estrutural como o ARBH traz efeitos sobre a distribuição do tráfego no município e na RMBH como um todo.

Como trabalhos futuros, sugere-se uma abordagem mais profunda na área da segurança viária, a fim de se estimar os efeitos relativos à variação da velocidade no ARBH sobre os recorrentes acidentes de trânsito e consequentes números de óbitos e feridos. Outra sugestão diz respeito à decomposição do ARBH em trechos. Realizar as análises, tanto operacionais quanto de segurança viária, em uma abrangência mais local permitiria aferir melhor os indicadores dos cenários e direcionar as decisões conforme as características de cada trecho.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPEMIG, pelo apoio financeiro sob número de processo APQ-03779-16, e ao CNPq, pela Bolsa de Produtividade sob o número de processo 312651/2018-0. Agradecem, ainda, a Aimsun, pelo fornecimento da licença acadêmica do Aimsun Next, e à CAPES, pelo suporte à pesquisa.

REFERÊNCIAS

- CINDS - Centro Integrado de Informações da Defesa Social (2014). *Diagnóstico de Trânsito de Minas Gerais - 2012/2013*: Minas Gerais: http://www.seguranca.mg.gov.br/images/seds_docs/estatisticas/Estatisticas_transito/estatisticas%20de%20transito%202012-13.pdf. Acessado em 16/12/2018.
- CINDS - Centro Integrado de Informações da Defesa Social (2015). *Diagnóstico de Acidentes de Trânsito de Minas Gerais - 2013/2014*: http://www.seguranca.mg.gov.br/images/seds_docs/estatisticas/Estatisticas_transito/Acidentes%20de%20transito-anos%2013%20e%2014.pdf. Acessado em 16/12/2018.
- CINDS - Centro Integrado de Informações da Defesa Social (2016). *Diagnóstico de Acidentes de Trânsito de Minas Gerais - 2014/2015*: http://www.seguranca.mg.gov.br/images/seds_docs/estatisticas/Estatisticas_transito/2016.04.15_CINDS_SEDS-MG_DIAGNOSTICO_DE_ACIDENTES_DE_TRAN-SITO_MG_2014-2015.pdf. Acessado em 16/12/2018.
- Consórcio CGP - CEPROL - AFIRMA (2014). *Projeto Executivo de Engenharia para as Obras de Melhorias e Adequação de Capacidade e Segurança do Anel Rodoviário de Belo Horizonte nas Rodovias BR-262/040/MG*. Belo Horizonte.
- Ewing, R; E. Dumbaugh. (2009). The built environment and traffic safety: a review of empirical evidence. *Journal of Planning Literature*, v. 23, n. 4, p. 347-367.
- Governo do Estado de Minas Gerais (2017). *Diagnóstico de Acidentes de Trânsito de Minas Gerais - 2015/2016*: http://www.seguranca.mg.gov.br/images/2017/Setembro/OSPC_SESP-MG_DIAGNOSTICO_DE_ACIDENTES_DE_TRANSITO_MG_2015-2016.pdf. Acessado em 16/12/2018.
- Haddon Jr., W. (1972). A logical framework for categorizing highway safety phenomena and activity. *Journal of Trauma and Acute Care Surgery*, v. 12, n. 3, p. 193-207.
- Magalhães, V.; W. S. Oliveira; B. C. S. Maciel; J. E. Bessa Júnior; M. E. V. Moura e J. M. Pinto Júnior (2017) Calibração de submodelos comportamentais do simulador Aimsun para Belo Horizonte. Congresso Brasileiro de Mobilidade Urbana 2017, *Anais...*, Associação Nacional de Transportes Públicos.
- Sarno, C. C. B. (2016). *Benefícios Imediatos da Redução das Velocidades Máximas Permitidas: O caso das Marginais Tietê e Pinheiros*. Nota Técnica, nº 251. Companhia de Engenharia de Tráfego, São Paulo.
- Souza, V. C. (2019) *Desenvolvimento de método para obtenção do nível de serviço em rotatórias urbanas: o caso de Belo Horizonte*. Trabalho Integralizador Multidisciplinar III (Monografia). Curso de Engenharia Civil. Universidade Federal de Minas Gerais.
- Tectran - Técnicos em Transportes Ltda (2017). *Projeto do Anel Rodoviário de Belo Horizonte: Estudos de Tráfego, Capacidade e Níveis de Serviço*. Belo Horizonte.
- TSS (2018). *Aimsun 8.3: Dynamic Simulators User's Manual*. Transport Simulation Systems. Barcelona, Espanha.

Endereço para contato:

André Augusto Cunha Libânio (andre.libanio@fratar.com.br)

Rafael Quintão de Andrade (rafael.quintao@fratar.com.br)

Prof. Dr. José Elievam Bessa Júnior (elievam@etg.ufmg.br ou elievamjr@gmail.com)

Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Mestrado em Geotecnia e Transportes (GeoTrans)

Avenida Antônio Carlos, 6.627, Escola de Engenharia, Bloco 1, Pampulha, Belo Horizonte, MG, 31.270-901

Rodrigo Sório Coelho (rodrigo@fratar.com.br)

Fratar Engenharia Consultiva

Rua Amoroso Costa, 50, sala 203, Bairro Santa Lúcia, Belo Horizonte, MG, 30.350-570