



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

GABRIELA MARTINS DE OLIVEIRA

**AVALIAÇÃO DO IMPACTO DA INSERÇÃO DE VEÍCULOS AUTÔNOMOS EM VIA
ARTERIAL NO DESEMPENHO DA SEGURANÇA VIÁRIA**

FORTALEZA

2021

GABRIELA MARTINS DE OLIVEIRA

AVALIAÇÃO DO IMPACTO DA INSERÇÃO DE VEÍCULOS AUTÔNOMOS EM VIA
ARTERIAL NO DESEMPENHO DA SEGURANÇA VIÁRIA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Civil do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Flávio José Craveiro
Cunto, PhD.

FORTALEZA

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- O47a Oliveira, Gabriela Martins de.
Avaliação do impacto da inserção de veículos autônomos em via arterial no desempenho da segurança viária / Gabriela Martins de Oliveira. – 2021.
74 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Civil, Fortaleza, 2021.
Orientação: Prof. Dr. Flávio José Craveiro Cunto.
1. Veículo autônomo. 2. Microssimulação. 3. VISSIM. 4. Segurança viária. 5. SSAM. I. Título.
CDD 620
-

GABRIELA MARTINS DE OLIVEIRA

AVALIAÇÃO DO IMPACTO DA INSERÇÃO DE VEÍCULOS AUTÔNOMOS EM VIA
ARTERIAL NO DESEMPENHO DA SEGURANÇA VIÁRIA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Civil do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia Civil.

Aprovada em: 01 de Abril de 2021

BANCA EXAMINADORA

Prof. Flávio José Craveiro Cunto, PhD. (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Manoel Mendonça de Castro Neto, PhD
Universidade Federal do Ceará (UFC)

MSc. Janailson Queiroz Sousa

À minha família, por sua capacidade de acreditar em mim e investir em mim. Seus conselhos e incentivos constantes me deram a motivação para sempre seguir adiante. Sem o apoio de vocês, não teria conseguido superar os desafios dessa caminhada.

AGRADECIMENTOS

À minha família, em especial meus pais, Naiara e Marcos, os quais sempre foram fonte de inspiração e sempre me motivaram a acreditar em mim. Ao meu irmão, Felipe, por sempre estar presente para me dar conselhos e apoio quando mais preciso.

Ao professor Flávio, que com o seu bom humor e leveza foi capaz de tornar esse processo de conclusão de curso muito mais tranquilo. Obrigada por todos os ensinamentos e pela paciência.

Ao professor Manoel Mendonça e ao mestre Janailson Queiroz por terem aceitado participar da banca examinadora.

Aos meus amigos de graduação, Babi, Brenda, Bia, Cacau, Caio, Gabi, Jo, Ivan, Nat, Wandersson. Obrigada pelos inúmeros estudos em grupo, obrigada pelo apoio durante os momentos mais difíceis dessa jornada.

Ao meus colegas de grupo de pesquisa, Altanízio, Caio, Mateus e Vanessa, que sempre estiveram disponíveis para contribuir com sugestões para a realização deste trabalho.

Aos meus colegas do GTTEMA, que estiveram presentes para sanar minhas inúmeras dúvidas durante a realização deste trabalho.

A todos os professores e professoras da Universidade Federal do Ceará que de alguma forma estiveram presentes nesses anos de engenharia, a vocês devo minha formação.

”Em algum lugar, algo incrível está esperando
para ser descoberto.”

(Carl Sagan)

RESUMO

O desenvolvimento e a aplicação dos sistemas de transporte inteligente vêm proporcionando mudanças significativas no funcionamento do tráfego urbano e rodoviário. O veículo autônomo (AV) é exemplo dessa tecnologia, a qual consiste em um veículo capaz de desempenhar o processo de condução quase ou totalmente independente da atuação de um motorista, e é previsto que eles estejam participando do tráfego em penetrações relevantes nas próximas décadas. Em relação ao desempenho de segurança viária, espera-se que em um cenário de automação total, ou seja, AVs compondo a maioria dos veículos, sejam reduzidos os sinistros de trânsito, uma vez que falhas no processo de condução estão presentes nos fatores contribuintes de 94% dos atuais sinistros. Porém, até que AVs sejam maioria, existirá um período de transição em que AVs e veículos convencionais irão interagir, e o presente trabalho objetiva compreender como serão caracterizadas essas interações em ambiente urbano. Uma vez que estudos observacionais não são aplicáveis, devido a ainda inexpressiva penetração de AVs nas vias e a consequente falta de dados históricos de sinistros, utilizou-se a microssimulação como ferramenta de análise dos cenários de transição. Para representar o comportamento de AVs na simulação, foram adotados parâmetros calibrados pelo projeto CoExist. A avaliação do desempenho de segurança viária utilizou o software Surrogate Safety Assessment Model (SSAM) para verificar a geração de conflitos veiculares no arquivo de trajetória exportado pelo VISSIM, e avaliaram-se dois indicadores *proxy*, TTC e MaxS, para compreender a severidade desses conflitos. Foi possível perceber uma restrita capacidade do VISSIM em representar a automação com base em recursos internos ao software, ficando a representação mais detalhada bastante dependente de plataformas externas ao microssimulador. Os resultados obtidos indicaram que um modo de condução mais cauteloso atribuído ao AV é capaz de reduzir até 42% o número de conflitos em relação ao cenário base. Também foi obtido um resultado contra intuitivo de que a inserção de AVs com modo de condução mais agressivo aumenta em até 87,6% o número de conflitos. A severidade dos possíveis sinistros decorrentes de conflitos foi atenuada com a presença de AVs no tráfego, pois ocorreu uma redução de até 23% na velocidade máxima dos veículos envolvidos no conflito.

Palavras-chave: Veículo autônomo (AV). Microssimulação. VISSIM. Segurança Viária. SSAM.

ABSTRACT

The development and application of intelligent transport systems are responsible for significant changes in the logistics of urban and road traffic. The autonomous vehicle (AV) is an example of this technology, which can be described as a vehicle capable of driving almost or totally independent of the human driver, and they are expected to be participating in traffic at relevant penetrations in the coming decades. In relation to road safety performance, it is expected that in a scenario of total automation, traffic accidents will be reduced, since failures in the driving process are present in the contributing factors of 94% of current traffic accidents. However, until AVs are majority, there will be a transition period in which AVs and conventional vehicles will interact, and the present work aims to understand how these interactions will be characterized in an urban environment. Since observational studies are not applicable, due to the still inexpressive AV penetration in the roads and the consequent lack of historical claims data, microsimulation was used as an analysis tool for the transition scenarios. In order to represent the behavior of AVs in the simulation, parameters calibrated by the CoExist project were adopted. The road safety performance evaluation used the software Surrogate Safety Assessment Model (SSAM) to verify the number of vehicular conflicts in the trajectory file exported by VISSIM, and this analysis was based in two surrogate safety measures, TTC and MaxS, to understand the severity of these conflicts. It was possible to verify a limited capacity of VISSIM to represent automation, and a more detailed representation is dependent on External Driver Model Application Programming Interface. The results obtained indicated that a cautious driving behaviour attributed to the AV is capable of reducing up to 42% the number of conflicts in relation to the base scenario. A counter intuitive result was obtained: AVs with a more aggressive driving mode increases the number of conflicts by up to 87.6%. The severity of possible accidents consequent from conflicts was mitigated with the presence of AVs in traffic, as there was a reduction of up to 23% in the maximum speed of the vehicles involved in the conflict.

Keywords: Autonomous Vehicles. Microsimulation. VISSIM. Road safety. SSAM.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Percepção 360° dos sensores de um AV.	23
Figura 2 – Fluxograma do mecanismo de controle de um AV.	25
Figura 3 – Pirâmide de Hydén	29
Figura 4 – Metodologia adotada.	32
Figura 5 – Corredor arterial Av. Santos Dumont.	33
Figura 6 – Volumes coletados Av. Santos Dumont.	34
Figura 7 – Interseção não semaforizada entre a Av. Santos Dumont e a Rua Antônio Augusto	35
Figura 8 – Novas funcionalidades do VISSIM adaptadas para representar AVs	40
Figura 9 – Curva de aceleração desejada para AVs.	41
Figura 10 – Modelo psicofísico de <i>car following</i> proposto por Wiedemann	43
Figura 11 – Detalhamento das variáveis de controle definidas para compor os cenários de simulação	46
Figura 12 – Limite angular para cada tipo de conflito	48
Figura 13 – Gráfico de resíduos versus de ajustes	53
Figura 14 – Gráfico de resíduos versus ordem	54
Figura 15 – Gráfico de probabilidade normal	54
Figura 16 – Gráfico de efeitos principais para número de conflitos	55
Figura 17 – Gráfico de interação entre as variáveis Tipo de AV e Fluxo	56
Figura 18 – Gráfico de interação entre as variáveis Tipo de AV e Penetração de AV	57
Figura 19 – Número médio de conflitos simulados com AV Cauteloso	58
Figura 20 – Número médio de conflitos simulados com AV Agressivo	60
Figura 21 – Conflitos veiculares com TTC igual a zero	63
Figura 22 – Distribuição de TTCs para diferentes penetrações de AV	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Categorias de AVs propostas pela Atkins (2016)	21
Tabela 2 – Principais sensores instalados em um AV.	22
Tabela 3 – Comportamentos dos veículos autônomos propostos pelo projeto CoExist .	28
Tabela 4 – Estudos recentes do impacto da automação e/ou da conectividade dos veículos na segurança viária	30
Tabela 5 – Valores dos parâmetros dos modelos do VISSIM calibrados e validados. . .	37
Tabela 6 – Parâmetros de <i>Slow Recovery</i> e valores adotados	38
Tabela 7 – Parâmetros de <i>car following</i> W99 para representar AVs indicados pelo CoExist	44
Tabela 8 – Estatística descritiva do número de conflitos por cenário	52
Tabela 9 – Resultados obtidos na análise de variância	52
Tabela 10 – Variação do número médio de conflitos com AV Cauteloso	58
Tabela 11 – Percentual de conflitos envolvendo AV Cauteloso	59
Tabela 12 – Percentual de conflitos AV-AV para cenários cautelosos	59
Tabela 13 – Variação do número médio de conflitos com AV Agressivo	61
Tabela 14 – Percentual de conflitos envolvendo AV Agressivo	61
Tabela 15 – Percentual de conflitos AV-AV para cenários agressivos	62
Tabela 16 – Redução do número de conflitos totais após filtragem de TTC para AV Cauteloso	64
Tabela 17 – Redução do número de conflitos totais após filtragem de TTC para AV Agressivo	64
Tabela 18 – Comparativo de MaxS entre cenários de baixa demanda e baixa penetração .	66
Tabela 19 – Comparativo de MaxS entre cenários de baixa demanda e alta penetração . .	67
Tabela 20 – Comparativo de MaxS entre cenários de alta demanda e baixa penetração . .	67
Tabela 21 – Comparativo de MaxS entre cenários de alta demanda e alta penetração . . .	68
Tabela 22 – Resumo das alterações na média de MaxS em comparação ao cenário base .	68
Tabela 23 – Distribuição dos tipos de conflitos para cenários com AV Cauteloso	69
Tabela 24 – Distribuição dos tipos de conflitos para cenários com AV Agressivo	70

LISTA DE SÍMBOLOS

ADAS	Sistemas Avançados de Assistência ao Motorista
AV	Veículo Autônomo
CAV	Veículo Autônomo e Conectado
CV	Veículo Conectado
ITS	Sistema de Transporte Inteligente
MaxS	Velocidade máxima em conflito
NHTSA	Administração Nacional de Segurança no Trânsito nas Rodovias
PET	Tempo pós-invasão
SAE	Sociedade de Engenheiros Automotivos
SSAM	<i>Surrogate Safety Assessment Model</i>
TTC	Tempo para colisão

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Problema motivador	17
1.2	Questões Motivadoras	17
1.3	Objetivos da pesquisa	18
<i>1.3.1</i>	<i>Objetivo Geral</i>	<i>18</i>
<i>1.3.2</i>	<i>Objetivos específicos</i>	<i>18</i>
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1	Caracterização de veículos autônomos	19
<i>2.1.1</i>	<i>Classificação de Veículos autônomos</i>	<i>19</i>
<i>2.1.2</i>	<i>Equipamentos, funcionalidades e mecanismo de controle dos AVs</i>	<i>21</i>
<i>2.1.3</i>	<i>Automação e conectividade</i>	<i>25</i>
2.2	Microsimulação de tráfego com AVs	27
2.3	Desempenho da Segurança Viária	28
3	MÉTODO	32
3.1	Codificação da Rede	32
<i>3.1.1</i>	<i>Modelagem da Avenida Santos Dumont</i>	<i>33</i>
<i>3.1.2</i>	<i>Calibração e Validação</i>	<i>35</i>
<i>3.1.2.1</i>	<i>Análise de sensibilidade dos parâmetros nas medidas de desempenho</i>	<i>35</i>
<i>3.1.2.2</i>	<i>Processo de calibração</i>	<i>36</i>
<i>3.1.2.3</i>	<i>Processo de validação</i>	<i>36</i>
<i>3.1.2.4</i>	<i>Adaptações na calibração</i>	<i>37</i>
3.2	Representação de Veículos Autônomos no VISSIM	39
<i>3.2.1</i>	<i>Modos de condução de AV</i>	<i>39</i>
<i>3.2.2</i>	<i>Atualizações do VISSIM dedicadas aos AVs</i>	<i>39</i>
<i>3.2.3</i>	<i>Comportamento determinístico</i>	<i>41</i>
<i>3.2.4</i>	<i>Driving behaviours</i>	<i>42</i>
3.3	Cenários de simulação	45
3.4	Análise de variância entre cenários	46
3.5	Escolha de indicadores <i>proxy</i> para avaliar a segurança viária	47
4	ANÁLISE DOS RESULTADOS	51

4.1	Estatística descritiva dos cenários	51
4.2	Análise de variância	51
4.2.1	<i>Adequação da ANOVA</i>	<i>53</i>
4.2.2	<i>Análise dos efeitos principais</i>	<i>55</i>
4.2.3	<i>Análise dos efeitos de interação</i>	<i>56</i>
4.3	Incidência dos conflitos	58
4.3.1	<i>Cenários com penetração de AV Cauteloso</i>	<i>58</i>
4.3.2	<i>Cenários com penetração de AV Agressivo</i>	<i>60</i>
4.4	Severidade dos conflitos	62
4.4.1	<i>Filtro de TTC</i>	<i>63</i>
4.4.2	<i>Distribuição de TTCs</i>	<i>64</i>
4.4.3	<i>Comparação de MaxS</i>	<i>65</i>
4.5	Classificação dos conflitos	69
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	71
	REFERÊNCIAS	74

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas de transporte inteligente (ITS, do inglês *Intelligent Transport System*) são responsáveis por integrar diferentes agentes do tráfego urbano e rodoviário, e seu surgimento tornou possível que veículos, infraestrutura, pedestres, ciclistas, sistemas de transporte público e centrais de controle de trânsito trocassem informações em tempo real, facilitando o processo de definir estratégias para solucionar possíveis transtornos de mobilidade. Sua tecnologia é aplicável, por exemplo, para reduzir congestionamentos em interseções semaforizadas, a partir de um ajuste dinâmico nos ciclos dos semáforos dependendo da demanda. Outra utilização do ITS encontra-se no pagamento eletrônico a partir do próprio veículo, o que torna instantâneo o tempo de atendimento por automóvel em cabines de pedágio, e, conseqüentemente, implica na redução da formação de filas. Ademais, a tecnologia do ITS também é utilizada no processo de pesagem de caminhões em movimento em rodovias, *Weigh in motion*, o que reduz o tempo demandado por esta atividade. Dessa forma, torna-se evidente como a tecnologia ITS oferece uma ampla variedade de benefícios para o transporte particular e público, desde facilitar o planejamento de viagens e a seleção de modais até fornecer melhorias na segurança pública ao gerenciar os sistemas de transporte durante incidentes, emergências e desastres naturais (NOYES, 2020).

Uma das aplicações mais recentes do ITS, que inclusive se encontra em circulação em alguns países, mesmo que em período de testes, é o veículo autônomo (AV, do inglês *Autonomous Vehicles*). Esse automóvel é desenvolvido com tecnologia capaz de desempenhar, parcialmente ou totalmente, a função do motorista. AVs possuem a habilidade de monitorar o ambiente, de controlar a própria velocidade a partir da aceleração de veículos próximos e da velocidade máxima indicada na via e de planejar uma mudança de faixa, por exemplo.

O veículo autônomo possui múltiplas definições reportadas pela literatura, sendo mais adotada aquela proposta pela Sociedade de Engenheiros Automotivos (SAE,2014). De acordo com a Norma SAE J3016 – Taxonomia e Definições para Termos Relacionados a Sistemas de Direção Autônoma para Veículos Motorizados, os AVs são classificados em seis níveis, indo zero ao cinco, sendo o mais baixo "Sem automação" e o mais alto "Automação completa". Os intermediários caracterizam-se pela adição de funcionalidades que auxiliam o motorista na sua condução, evoluindo até o estado de controle total.

Em 2030, estima-se que os AVs com automação total terão uma frota de aproximadamente 2,2 milhões de veículos em todo o mundo, correspondendo a uma penetração de 1,9%, (IHS, 2016), e o aumento da sua participação nas vias implica em profundas mudanças

no funcionamento de cidades. Os AVs trarão melhorias na trafegabilidade de pessoas e de bens, uma vez que se prevê redução de congestionamentos, aumento da mobilidade urbana, redução da emissão de gases poluentes e aumento da segurança viária (SANTOS *et al.*, 2018). No que tange à fluidez viária, os AVs poderão ser responsáveis por aumentar a capacidade das vias (BERG; VERHOEF, 2016), já que possuem comportamento integrado ao dos demais veículos, e isso possibilita que circulem com menores espaçamentos do que carros dirigidos por humanos, o que será uma das principais vantagens da sua implantação.

Além disso, um outro viés vantajoso da implantação dos AVs é o da possível redução de sinistros viários. Estes são responsáveis por aproximadamente 1,35 milhão de mortes por ano (WHO, 2018), sendo a principal causa de morte entre crianças de 5 a 14 anos e entre jovens de 15 a 29 anos, o que se classifica como uma epidemia mundial. Posto que falhas no processo de condução estão presentes nos fatores contribuintes de 94% acidentes de trânsito (SINGH, 2015), infere-se que quanto menos veículos dirigidos por humanos, menores serão as chances de ocorrência de conflitos.

Até 2030 haverá uma penetração de 1 a 11% para veículos parcialmente autônomos (MILAKIS *et al.*, 2016), ou seja, os AVs ainda não terão atingido uma porcentagem elevada da frota de veículos em circulação, e enquanto isso não acontece a porcentagem irá elevar-se gradualmente, o que implicará em motoristas e AVs compartilhando o uso das vias, cenário que poderá ou não contribuir para uma redução das perdas derivadas de acidentes. Ainda não é possível indicar exatamente qual será esse impacto, uma vez que AVs precisam de centenas de milhões de milhas e às vezes centenas de bilhões de milhas de circulação para demonstrar sua confiabilidade em termos de fatalidades e lesões (KALRA; PADDOCK, 2016).

Dados reais de sinistros viários provocados pelos AVs levarão décadas para serem coletados, uma vez que AVs ainda estão em período de testes, portanto torna-se impossível aplicar a metodologia mais comum de análise de segurança viária, a qual usa bancos de dados de acidentes de trânsito e técnicas estatísticas que relacionam atributos geométricos/operacionais e o número (ou taxa) de acidentes de trânsito observados em um determinado período (CUNTO; LOUREIRO, 2011). Nesse caso, para contornar essa falta de informação, trabalhos recentes que buscaram analisar os impactos de AVs na segurança viária ou na fluidez (KAPPLER, 2020; PAPADOULIS *et al.*, 2019; RAHMAN *et al.*, 2018) utilizaram a microssimulação, ferramenta apontada como uma maneira mais segura, eficiente e barata de realizar essas previsões em comparação com o teste com situações reais (RAHMAN *et al.*, 2018).

É relevante citar, ainda, que os diferentes microssimuladores comercialmente disponíveis, como o AIMSUN, Paramics, SUMO, MOVSIM e VISSIM, ainda não são capazes de representar diretamente um acidente viário. Dessa forma, para avaliar o impacto dos AVs na segurança viária é necessário utilizar uma metodologia proposta por Hydén (1987) a qual avalia conflitos veiculares, definidos como situações de risco entre veículos que não culmina em acidente. Nessa metodologia são utilizados indicadores *proxy* de segurança para definir numericamente um conflito, e a partir dessa definição é possível analisar os resultados da microssimulação.

1.1 Problema motivador

Há uma expectativa que a presença de veículos autônomos (AVs) nas vias aumente a segurança viária, já que eliminariam as falhas humanas no processo de condução, um dos principais fatores relacionados a acidentes viários. Todavia, ainda não se conhece qual será o efeito da interação de AVs e motoristas durante o longo período de transição, onde esses irão compartilhar infraestrutura.

Como os AVs ainda estão em fase de testes, com uma penetração baixa, não existem dados reais de acidentes viários que embasem estudos observacionais. Além disso, o principal método avaliativo disponível, a microssimulação, ainda encontra dificuldade para conseguir representar o comportamento dos AVs o mais próximo do real, devido à sua complexidade.

1.2 Questões Motivadoras

A partir da contextualização da problemática exposta é possível delinear as seguintes questões que motivaram o presente trabalho.

- a) Quais as principais características de operação dos AVs e quais seus principais componentes?
- b) Como representar o comportamento dos AVs em uma microssimulação no microssimulador VISSIM?
- c) Como quantificar e classificar o impacto da inserção de AVs em via urbana na segurança viária?
- d) Qual o impacto do nível de penetração de AVs na frota convencional de veículos na segurança viária?

- e) Como a demanda veicular influencia a interação entre AVs e veículos convencionais?

1.3 Objetivos da pesquisa

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é avaliar o impacto da inserção de veículos autônomos em via arterial no desempenho da segurança viária utilizando conflitos veiculares simulados no microssimulador VISSIM.

1.3.2 Objetivos específicos

- a) Identificar as principais características de operação de AVs e analisar a adequabilidade do microssimulador VISSIM para representá-las.
- b) Avaliar a frequência e a severidade de conflitos veiculares entre AVs e veículos convencionais.
- c) Verificar como diferentes taxas de penetração de AV afetam as interações veiculares entre AVs e veículos convencionais.
- d) Verificar como a demanda veicular afeta as interações veiculares entre AVs e veículos convencionais.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo será dividido em três tópicos principais, e o primeiro dará uma descrição dos componentes, das classificações e das características de operação dos AVs. Logo em seguida, será discutido o processo de microssimulação de tráfego, com destaque para os modelos adotados pelo microssimulador VISSIM, e como as características de funcionamento dos AVs são representadas em uma modelagem microscópica. O último tópico abordará o processo de avaliação do desempenho de segurança viária e sobre como estudos estão prevendo o impacto da interação entre AVs e veículos tradicionais na segurança.

2.1 Caracterização de veículos autônomos

A seguir serão descritas as principais classificações adotadas para autonomia de veículos, além de um detalhamento de aspectos físicos dos AVs, descrevendo quais os dispositivos instalados, quais suas principais funcionalidades e como ocorre o mecanismo de controle do AV.

2.1.1 *Classificação de Veículos autônomos*

De acordo com a Norma SAE J3016 (SAE INTERNATIONAL, 2014) – Taxonomia e Definições para Termos Relacionados a Sistemas de Direção Autônoma para Veículos Motorizados, existem seis níveis de automação de um veículo:

- **Nível 0 - Nenhuma Automação:** O motorista é totalmente responsável pelo processo de condução (frenagem, direção e aceleração) em todos os momentos, e é seu dever observar o ambiente e operar com segurança todos os comandos do veículo.
- **Nível 1 - Automação de direção assistida:** O condutor ainda é responsável por monitorar o ambiente e pela operação segura do veículo, mas este auxilia o motorista a partir de ferramentas de controle primário (como direção ou frenagem). O automóvel possui ferramentas como o piloto automático adaptável, o qual ajusta a velocidade e mantém uma distância de segurança dos objetos e dos veículos à frente, ou como o sensor de ré.
- **Nível 2 - Automação parcial:** O veículo possui a automação de pelo menos duas funções de controle primário, e continua a depender do condutor para monitorar o ambiente e intervir caso um acontecimento que exceda a capacidade do sistema ocorra. Nesse nível, o automóvel ajusta sua velocidade de acordo com o tráfego adiante e é capaz de realizar

curvas em condições ideais. Além disso, é capaz de utilizar funções combinadas do sistema de manutenção de faixa e piloto automático adaptativo, por exemplo.

- **Nível 3 - Automação condicional:** A partir desse nível, o responsável por monitorar o ambiente passa a ser o sistema de automação do veículo e não o condutor. Na automação condicional, o veículo opera de forma autônoma em determinadas situações de tráfego, como em rodovias, por exemplo, mas mesmo nessas circunstâncias o motorista deve estar atento para operar o veículo em caso de solicitação feita pelo sistema. O modo "piloto de congestionamento" (*traffic jam pilot*) é utilizado em automóveis nível 3, o qual assume completamente a direção longitudinal e lateral ao detectar um congestionamento em uma rodovia.
- **Nível 4 - Alta automação:** A necessidade de motorista torna-se quase dispensável, podendo ser requisitada apenas em situações de clima extremo ou de direção em rodovias não mapeadas.
- **Nível 5 - Automação Total:** O nível 5 se diferencia do anterior por eliminar completamente a necessidade de um motorista, tendo todos os controles e responsabilidades de direção sendo executados por um sistema autônomo.

Essa classificação de AVs é adotada pela Administração Nacional de Segurança no Trânsito nas Rodovias (NHTSA), do Departamento de Transporte dos Estados Unidos, e pelas principais partes interessadas do setor automotivo (KAPPLER, 2020). Os níveis de automação propostos pela SAE dependem principalmente da intervenção do motorista e da atenção requerida no processo de direção, ilustrando a partir disso quais dispositivos e funcionalidades podem equipar o AV para substituir uma ação do condutor. A subseção 2.1.2 exemplifica quais são os principais componentes e funcionalidades inseridos nos AVs.

Propostas pela Atkins (2016), existem quatro categorias para descrever os recursos e exigências dos AVs conforme o padrão da SAE International para fins de representação dessa tecnologia em modelos de simulações de tráfego. Os níveis vão do I ao IV, e estão descritos na Tabela 1. A relevância desses critérios está na maior facilidade em poder representar um nível específico de automação durante uma simulação, o qual pode focar apenas em controle de velocidade e de aceleração, ou, além disso, controle longitudinal e lateral. Cada nível possui as características do seu anterior com a adição de alguma funcionalidade.

Tabela 1 – Categorias de AVs propostas pela Atkins (2016)

Nível de Capacidade	Descrição
I - Sem automação	Frota base de automóveis de passageiros e veículos de transporte de mercadorias.
II - Assistência ao motorista	Os veículos são caracterizados por terem melhor controle do acelerador e comportamento de aceleração mais suave.
III - Parcial (Alta Automação)	O veículo controla o comportamento longitudinal e lateral, conforme definido pelo usuário.
IV - Automação completa	O veículo controla o comportamento longitudinal e lateral em um nível aprimorado, completamente independente do motorista.

Fonte: ATKINS. (2016)

Além dessas classificações, existe a proposta pelo projeto CoExist que foca em aspectos microscópicos de representação do AV, e ela será a base para a realização deste trabalho. Tal projeto realizou testes em quatro cidades europeias, (Helmond – Holanda, Milton Keynes – Reino Unido, Gothemburg – Suíça e Stuttgart – Alemanha) para entender a influência do comportamento dos AVs em tráfego misto e busca avaliar seus impactos na segurança, operação de tráfego e demanda por espaço na infraestrutura viária (DAHL *et al.*, 2018), mas sua descrição será mais aprofundada na seção 2.2.

De maneira geral, espera-se que os veículos autônomos operem com menores headways, tempos de reação mais curtos, velocidades mais altas e de forma mais cooperativa do que os convencionais (STANEK *et al.*, 2017). Com o uso mais eficiente do espaço viário disponível, os benefícios podem ser alcançados para o usuário e para o operador, em termos de confiabilidade, menor tempo de viagem e atraso (ATKINS., 2016).

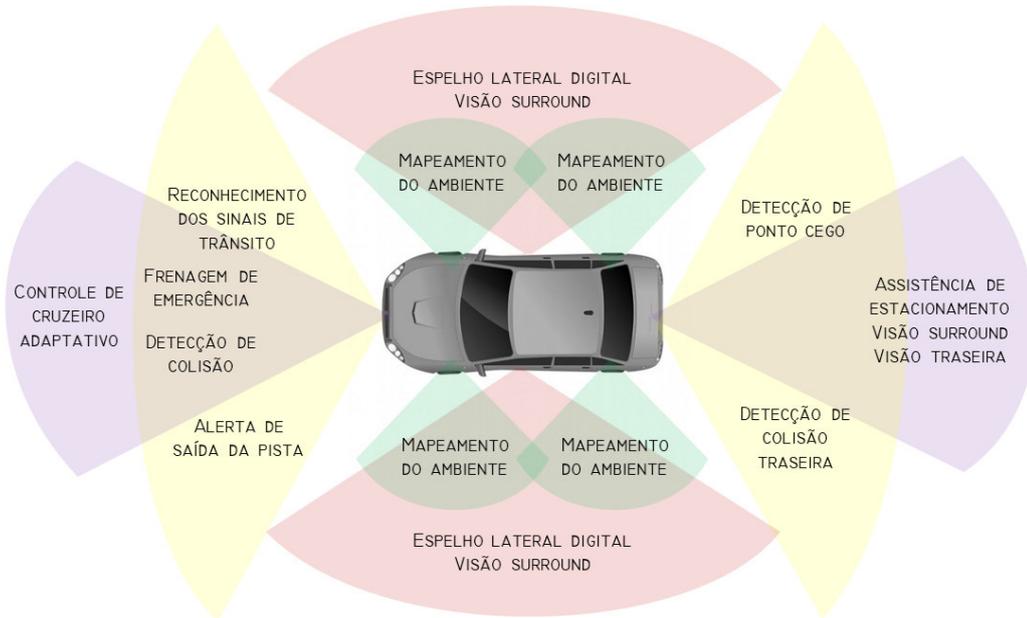
2.1.2 Equipamentos, funcionalidades e mecanismo de controle dos AVs

Para que as funcionalidades de automação existentes nos AVs possam tomar decisões seguras, dados de tráfego e de geometria da infraestrutura urbana devem ser coletados e avaliados. AVs possuem a habilidade de monitorar o ambiente devido aos inúmeros sensores instalados na parte externa do veículo, os quais visualizam a infraestrutura da via, os pedestres, os ciclistas, os demais veículos e a sinalização horizontal e vertical, conforme indicado na Figura 1. Essa gama de sensores vai detectar, "pensar" e agir pelo motorista e tais informações são interpretadas pelos softwares de inteligência artificial que farão tomadas de decisão (PIJPERS, 2007). Os principais sensores utilizados estão listados na Tabela 2.

Tabela 2 – Principais sensores instalados em um AV.

Sensor	Descrição
Sistema de câmeras	Responsável por enxergar longas distancias, realizando levantamento de dados do ambiente, como sinalização vertical e horizontal, além de detecção de obstáculos que possam existir ao redor do veículo, uma vez que possui visão 360°. As câmeras são sensíveis a variações climáticas severas. Funcionalidades de automação em que atua: assistente de mudança de faixa, assistente de permanência de faixa, sistema de alerta de pré-acidente, formação de pelotões e piloto automático adaptável.
Radar	A partir da emissão de ondas de rádio em pulsos, o radar é capaz de detectar a presença de objetos próximos (principalmente aqueles com superfície metálica), determinando dados como velocidade e a localização dos objetos próximos. Funcionalidades de automação em que atua: assistente de mudança de faixa, assistente de permanência de faixa, estacionamento automático, sistema de alerta de pré-acidente, sistema de alerta de colisão com obstáculo e piloto automático adaptável.
Lidar	É o sensor responsável por gerar um mapa 3D do ambiente a partir da emissão de raios lasers que criam uma nuvem de pontos ao serem refletidos pela superfície dos objetos adjacentes, porém nem todo tipo de material consegue refletir tais lasers. O Lidar possui um tamanho e custo muito elevado. Funcionalidades de automação em que atua: assistente de mudança de faixa, assistente de permanência de faixa, estacionamento automático, sistema de alerta de pré-acidente, sistema de alerta de colisão com obstáculo e piloto automático adaptável.
Sistemas ultrassônicos	É baseado em um sistema de detecção capaz de receber e transmitir ondas sonoras em uma frequência acima dos seres humanos. Funcionamento similar à de um radar esse sistema resulta em uma precisa coleta de informação em uma distância curta, até 10 metros. Possuindo um custo baixo esse sistema é usado em sensores de estacionamentos e assistentes de estacionamento.
Sensores infravermelhos	Usados em sua grande parte em assistentes de permanencia na faixa, os sensores não possuem as limitações de ambiente encontradas em câmeras e lasers e são úteis para detecção de pedestres e ciclistas, principalmente à noite.
GPS	Recebe sinais provenientes de satélites na orbita terrestre, podendo informar a posição do veículo nas ruas. O GPS já é usado na maioria dos carros à venda hoje, mas seus problemas de localização ainda são bem frequentes, podendo chegar a 10 metros de distância em relação a verdadeira posição do veículo.
Sistemas de navegação inercial	Calcula constantemente a posição, velocidade e direção do veículo em movimento. Muito útil trabalhando em conjunto com o GPS para evitar erros de posicionamento.

Figura 1 – Percepção 360° dos sensores de um AV.



Fonte: Adaptado de Qulsar (2020)

As diferentes combinações possíveis entre esses dispositivos físicos instalados em um veículo possibilitam diferentes funcionalidades de automação, ou ADAS (Sistemas Avançados de Assistência ao Motorista). Existem diversos ADAS existentes e em utilização, e os principais estão listados a seguir (PIJPERS, 2007).

- **Assistente de Mudança de Faixa:** O assistente de mudança de faixa cria condições de condução mais seguras, alertando o motorista que uma mudança de faixa pode ser perigosa. Uma distância de aviso de 70 metros dá ao motorista tempo suficiente para poder interromper a mudança de faixa. Essa função aumenta substancialmente os níveis de segurança da condução na rodovia.
- **Assistente de Permanência na Faixa:** O assistente de permanência na faixa visualiza as faixas da via através de uma câmera na parte superior do para-brisas e faz a correção na trajetória, atuando ativamente no volante do veículo ao perceber que ele está saindo involuntariamente da pista.
- **Estacionamento Automático:** A função de estacionamento automático calcula o espaço disponível da vaga e controla o direcionamento do volante do carro, e pode assumir o controle do motor durante uma manobra de estacionamento paralelo.
- **Sistema de pré-colisão:** A partir desse sistema, o veículo é capaz de detectar automaticamente se está na eminência de ter um acidente, sendo capaz de reagir em 200 milissegundos.

Em função da situação, aperta os cintos de segurança, ativa os piscas, sobe os vidros e fecha o teto panorâmico, evitando assim que qualquer extremidade do corpo possa sair do habitáculo.

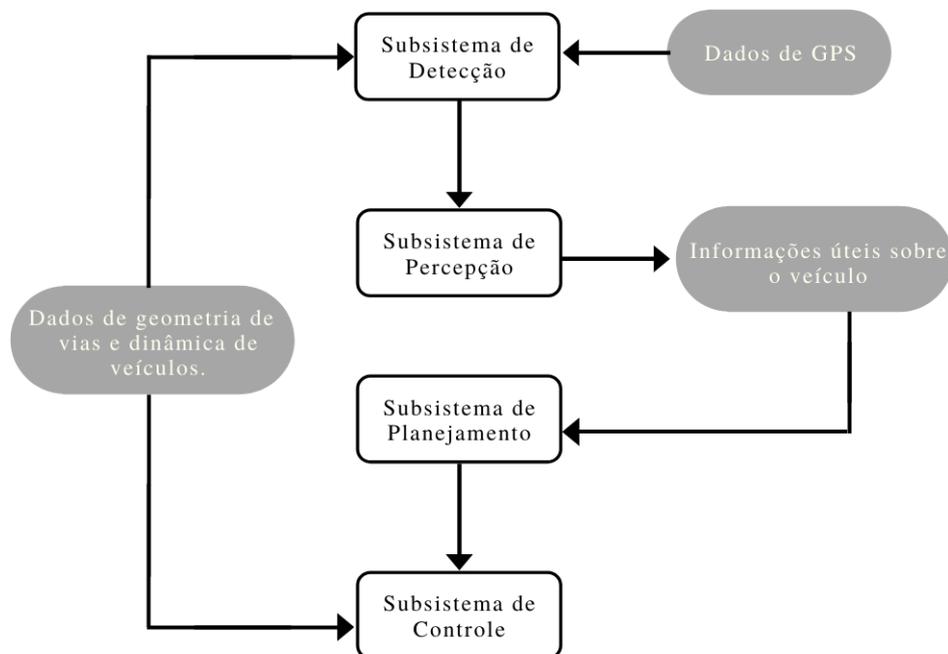
- **Sistema de prevenção de colisão:** Este sistema tem como objetivo avisar o condutor caso seja detetada uma potencial colisão com outro veículo ou obstáculo e assumir o controle do veículo em situações de emergência para evitar um acidente. O sistema assume o controle longitudinal e lateral durante o momento crítico.
- **Formação de pelotão:** Um pelotão consiste em um grupo de veículos (geralmente três ou mais) que estão conectados e seguem um ao outro de perto. Um exemplo de pelotão são os caminhões conectados para economizar espaço, combustível e aumentar o desempenho da rede viária;
- **Piloto Automático Adaptativo:** Este sistema é responsável por manter uma distância segura dos veículos precedentes, especialmente em condições de congestionamento. Para sua operação, eles dependem fortemente de uma variedade de sensores ativos, como laser, radares e lidars.

A presença dos ADAS em um veículo está diretamente associada aos níveis de automação propostos pela SAE, a depender do tipo de função que o sistema desempenha. Caso o sistema auxilie o condutor, como o sistema de câmera traseira ou de visão 360°, ou caso ele forneça algum tipo de aviso, como o citado sistema de prevenção de colisão, caracteriza-se um veículo com automação nível 1 da SAE. Já se o sistema disponibiliza assistência no processo de condução, a partir de dispositivos de piloto automático ou assistência ao estacionamento, por exemplo, caracteriza-se um veículo com automação nível 2 da SAE. Finalmente, caso o veículo possua algum sistema de automação, como o de formação de pelotões ou o de condução em congestionamentos, ele pode ser classificado do nível 3 ao 5, a depender do grau de independência de motorista que os ADAS instalados em conjunto possibilitam.

É relevante citar, por fim, como o processo de condução autônomo é organizado, quais as suas etapas e como elas estão conectadas. Todo o processo de captação de dados feita pelo sistema autônomo do AV até a interpretação dos mesmos pode ser dividido em subsistemas (PAPADOULIS *et al.*, 2019), e estes estão esquematizados no fluxograma da Figura 2. O propósito do subsistema de detecção é a coleta de dados brutos. Os dados do veículo, como posição lateral e longitudinal, são coletados por GPS e as medidas geométricas da pista e da estrada são coletadas por radares, lidars e câmeras. O subsistema de percepção é responsável por

traduzir os dados brutos recebidos pelo subsistema de detecção em informações úteis sobre o veículo, como a localização do veículo dentro de uma faixa, a localização de outros veículos ou a posição longitudinal do veículo na rede viária. O subsistema de planejamento inclui componentes como planejadores de caminho, planejadores de comportamento e planejadores de rota (mapa), e seu principal propósito é calcular uma rota livre de colisão, considerando as características cinemáticas do veículo, suas capacidades de manobra em um ambiente de tráfego misto, as regras de trânsito e limites físicos das vias (ZHANG *et al.*, 2013). É a etapa representada em simulações por meio de algoritmos de representação de AVs, como no trabalho de Papadoulis 2019. O subsistema de controle inclui os atuadores e comandos para dirigir o carro.

Figura 2 – Fluxograma do mecanismo de controle de um AV.



Fonte: Adaptado de Papadoulis *et al.* (2019).

2.1.3 Automação e conectividade

Embora estejam frequentemente associados, é preciso entender que automação e conectividade são conceitos independentes. As duas funcionalidades são complementares, porém é possível um veículo ser classificado apenas como autônomo, ou como conectado, ou, ainda, como autônomo e conectado. Esta seção abordará a conectividade em veículos, apesar do trabalho focar em veículos apenas autônomos.

Veículos conectados (CVs) são aqueles equipados com tecnologias avançadas de co-

municação que permitem a troca de informações, por meio de diferentes canais de comunicação, entre os vários elementos do sistema de transporte. Autores descrevem a conectividade futura como uma tecnologia veículo-para-todos os dispositivos (V2X), que inclui os demais recursos de comunicação (COPPOLA; SILVESTRI, 2019) citados seguir.

- a) Comunicação veículo-a-veículo (V2V): Permite realizar a troca de informações entre veículos, como alertas sobre as condições de tráfego;
- b) Comunicação veículo-para-infraestrutura (V2I): Promove a troca de dados entre veículos e a infraestrutura, com a qual é possível que os veículos sejam avisados sobre eventos como acidentes ou tenham acesso à programação semafórica para planejar travessias mais seguras e eficientes;
- c) Comunicação veículo-a-pessoas (V2P): Possibilita a integração entre dispositivos de smartphones e veículos conectados, sendo útil principalmente para usuários de transporte público que podem planejar melhor suas viagens;
- d) Comunicação veículos-à-rede (V2N): Inclui a troca de dados entre veículos e o Centro de Controle de Tráfego (TCC), para recebimento de informações em tempo real sobre as condições do tráfego.

É esperado que veículos conectados tragam benefícios para o desempenho operacional e para a segurança das vias, uma vez que são capazes de obter dados em tempo real de fluxo, de rotas de outros veículos, de programações semafóricas e de sinistros viários, por exemplo, e, assim, podem planejar viagens mais seguras e eficientes (STANEK *et al.*, 2017).

Mesmo os AVs e os CVs possuindo funcionamento complementar, existem desvantagens ao associar automação e conectividade, uma vez que veículos autônomos sem recursos de conectividade exigem menos complexidade organizacional, menos investimento em digitalização de infraestrutura e fornecem mais segurança cibernética, pois as possibilidades de hackers são reduzidas (POLIS, 2018). Contudo, ao comparar esses pontos com as potenciais melhorias de tráfego advindas da implantação dos CAVs, percebe-se que eles são meios para um ambiente de condução mais seguro e mais eficiente. (POLIS, 2018). Quando a alta automação for padronizada, as tecnologias veículo-a-veículo (V2V), veículo-para-infraestrutura (V2I) e veículo-a-pessoas (V2P) também devem estar disponíveis (COPPOLA; SILVESTRI, 2019).

2.2 Microssimulação de tráfego com AVs

A microssimulação é responsável por simular o comportamento individual de veículos em uma via, sendo usada para prever os prováveis impactos relativos a mudanças nos padrões de tráfego. Modelos microscópicos são o mais desagregados possíveis, modelando cada veículo individualmente, e devido a essa desagregação dos dados, torna-se o mais adequado para a visualização de alterações dentro da via, pois como cada veículo é simulado individualmente é mais perceptível o efeito de mudanças no tráfego.

A microssimulação tem como principal vantagem a modelagem de diversos cenários com grande facilidade de alterações, a possibilidade de modelar vários modos de transporte diferentes bem como o comportamento de cada condutor. Nesse sentido, trabalhos recentes que tiveram como objetivo analisar o impacto de veículos autônomos, conectados ou os dois, seja na fluidez viária, seja na segurança, utilizaram essa ferramenta para representar esses veículos em diversos cenários. A microssimulação é a principal ferramenta para este tipo estudo, uma vez que dados com situações reais ainda não estão disponíveis em quantidade significativa (RAHMAN *et al.*, 2019).

Um microssimulador representa o comportamento dos condutores individualmente a partir de modelos que buscam representar os padrões de condução adotados em determinada região. Ao verificar os estudos recentes com simulação de AVs, percebe-se que os softwares mais utilizados são: AIMSUN, Paramics, SUMO, MOVSIM e, principalmente, VISSIM.

O VISSIM, sigla que significa "Simulação de tráfego em cidades"(PTV, 2020), contempla os modelos comportamentais de seguimento veicular (*car-following*), que apresenta características psicofísicas, além dos modelos de mudança de faixa (*lane-changing*) e movimentos laterais (*lateral movements*), escolhas de rota e aceitação de brechas (*gap acceptance*). Todos esses modelos adotados pelo VISSIM serão melhor discutidos no Capítulo 3, onde serão apresentados os valores de parâmetros adotados que diferenciam a condução de um veículo convencional e de um AV.

Como citado na seção anterior, para poder representar o comportamento de um AV durante as simulações deste trabalho será adotada a classificação proposta pelo CoExist (SUKENNIK, P., 2018). CoExist consiste em um projeto europeu que foi idealizado com o objetivo de aumentar a capacidade das autoridades rodoviárias e de outros atores da mobilidade urbana para se prepararem para a fase de transição durante a qual os veículos autônomos e os convencionais coexistirão. O projeto é baseado em testes realizados com AVs em quatro cidades

européias (Helmond – Holanda, Milton Keynes – Reino Unido, Gothemburg – Suíça e Stuttgart – Alemanha), com diferentes estruturas urbanas e composições de tráfego, a fim de analisar seus efeitos na infraestrutura viária, em tráfego misto (DAHL *et al.*, 2018).

Como as características dos AVs tiveram que ser representadas no simulador, foram criadas adaptações dos resultados obtidos nos testes para definir os comportamentos de condução. Tal adaptação possui limitações, porém é fundamental para fins de comparação e pesquisa. Dessa forma, o CoExist propõe uma classificação para modelos microscópicos de representação de AVs. Ela deve ser vista como independente da classificação da SAE International, sem nenhuma correspondência entre os níveis da SAE International e as lógicas de direção definidas pelo projeto (DAHL *et al.*, 2018).

O CoExist propõe quatro configurações do sistema de navegação do veículo autônomo que poderão ser escolhidas pelo usuário a partir de sua necessidade, e estão descritas na Tabela 3 abaixo. Desde a versão 11, o VISSIM já possui parâmetros de comportamento de condução para cada um desses modos de condução, e foram definidos com base em estudos empíricos, suposições de co-simulação e dados coletados do estudo CoExist (SUKENNIK, P., 2018).

Tabela 3 – Comportamentos dos veículos autônomos propostos pelo projeto CoExist

Modo de Condução	Comportamento
<i>Rail Safe</i>	Comportamento análogo ao de um trem nos trilhos, seguindo um caminho pré-definido. Não estão previstas trocas de faixa e o veículo se comporta como se estivesse trafegando em uma faixa fisicamente segregada.
Cauteloso	O veículo observa a estrada e os obstáculos e sempre adota um comportamento seguro. Mantém headways que permitam uma distância de parada sem que ocorra colisão.
Normal	O AV comporta-se como um motorista humano, com a capacidade adicional de medir distâncias e velocidades dos veículos ao seu redor, com sua gama de sensores.
<i>All knowing</i>	Tem uma consciência profunda e capacidade de previsão, levando principalmente a falhas menores em todas as manobras e situações. Um tipo de comportamento cooperativo é esperado.

Fonte: Adaptado de Kappler (2020)

2.3 Desempenho da Segurança Viária

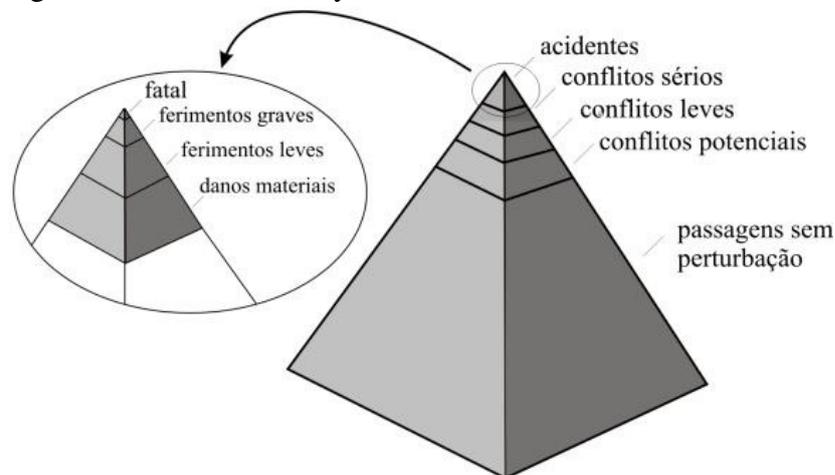
Espera-se que os veículos autônomos sejam benéficos para a segurança das vias, já que a maioria dos acidentes está relacionada a erros humanos, como fadiga, consumo de

álcool ou drogas (SINGH, 2015). Contudo, como os AVs ainda estão em período de testes não é possível afirmar certamente qual será o seu impacto, pois não existem dados suficientes disponíveis de acidentes viários com AVs, e, assim, torna-se impossível aplicar a metodologia mais comum de análise de segurança viária, a qual usa bancos de dados de acidentes de trânsito e técnicas estatísticas que relacionam atributos geométricos/operacionais e o número (ou taxa) de acidentes de trânsito observados em um determinado período (CUNTO; LOUREIRO, 2011).

Assim, o estudo do impacto de AVs na segurança viária depende de resultados de simulações de tráfego gerados por microsimulação, e uma vez que não é possível representar adequadamente um acidente durante uma simulação, a metodologia de análise será a de verificação de conflitos como foi realizado em trabalhos anteriores (Kappler (2020); Papadoulis *et al.* (2019); Rahman *et al.* (2018)).

Esse método avaliativo teve sua primeira introdução como alternativa ao uso dos acidentes em estudos de segurança, no final da década de 60, por Perkins e Harris (1968). O trabalho deles utilizava situações de risco entre veículos que não culminaram em acidentes, ou seja, os conflitos de tráfego. Ao longo dos anos essa abordagem incorporou conceitos e procedimentos diferentes em vários países, entretanto a técnica sueca de Análise de Conflitos de Tráfego, com o trabalho inicial de Hydén (1987), é uma das mais bem sucedidas. Portanto, observa-se a criação de um novo paradigma no qual o conceito de segurança no tráfego passa a ser visto como uma sequência de eventos cronologicamente dependentes que variam desde passagens sem distúrbio a acidentes. Esse conceito é conhecido como continuum de segurança, representado pela pirâmide de Hydén (1987), conforme mostrado na Figura 3.

Figura 3 – Pirâmide de Hydén



Fonte: Hydén (1987)

Para identificar a presença desses conflitos em resultados de microsimulação existem diversos indicadores *proxy* de segurança viária que possibilitam verificar a quantidade e a seriedade desses possíveis acidentes. Os mais utilizados para quantificar os conflitos e verificar sua severidade (Kappler, 2020; Papadoulis, 2019) são o tempo para colisão (TTC - *time to collision*), o tempo pós-invasão (PET- *post-encroachment time*) e o diferencial de velocidade (DeltaS).

Para definir os valores desses indicadores *proxy*, e, assim, verificar os conflitos gerados em cada simulação, é utilizado o software *Surrogate Safety Assessment Model* (SSAM), desenvolvido pela Administração Federal de Rodovias dos EUA (FHWA) para realizar análises estatísticas da saída de dados da trajetória do veículo a partir de modelos microscópicos de simulação de tráfego. O software calcula uma série de indicadores *proxy* de segurança para cada conflito que é identificado nos dados de trajetória após o usuário definir valores limites para *TTC*, *PET* e ângulos entre os veículos envolvidos em cada tipo de colisão. Em seguida, calcula resumos (média, valores máximo e mínimo, etc.) de cada indicador.

Como já é possível observar a presença de AVs em determinados países, mesmo que em fase experimental e em níveis intermediários de automação, diversos estudos estão focando em analisar se essa suposição de melhoria da segurança viária realmente acontecerá. A Tabela 4 abaixo resume alguns desses trabalhos.

Tabela 4 – Estudos recentes do impacto da automação e/ou da conectividade dos veículos na segurança viária

Referência	Foco do Estudo	País
Kappler (2020)	AV em rodovia	Brasil
Papadoulis <i>et al.</i> (2019)	CAV em rodovia	Inglaterra
Rahman <i>et al.</i> (2018)	CV em rodovia	EUA
Morando <i>et al.</i> (2018)	AV em via arterial	EUA

Fonte: Adaptado de Rahman *et al.* (2019)

Kappler (2020) avaliou o impacto de AVs em uma rodovia brasileira no desempenho da segurança viária, comparando o cenário base, ou seja, composto apenas por veículos convencionais, e um cenário composto 100% por AVs, constatando uma redução de até 92% do número de eventos que seriam considerados conflitos totais e por colisão traseira..

Papadoulis *et al.* (2019) focaram seu estudo em como a inserção de CAVs afeta a segurança viária de uma rodovia na Inglaterra, obtendo resultados positivos para a automação e conectividade. Os resultados mostraram que os CAVs trazem benefícios para a segurança

no trânsito, uma vez que os conflitos de tráfego reduzem significativamente, mesmo em taxas de penetração relativamente baixas. Especificamente, os conflitos de tráfego estimados foram reduzidos em 12–47%, 50–80%, 82–92% e 90–94% para taxas de penetração de CAV de 25%, 50%, 75% e 100%, respectivamente.

Rahman *et al.* (2018) avaliaram os impactos da implantação de CVs em rodovias em condições de neblina para dois tipos de abordagens: veículos conectados sem platooning (CVWPL) e veículos conectados com platooning (CVPL). Os resultados mostraram que ambos melhoraram significativamente a segurança em condições de neblina à medida que as taxas de penetração aumentaram. Conforme resultados do estudo, a taxa mínima de penetração deve ser de 30% para fornecer benefícios significativos à segurança. Em termos de medidas substitutas de segurança, o CVPL superou significativamente o CVWPL quando as taxas de penetração foram iguais ou superiores a 50%.

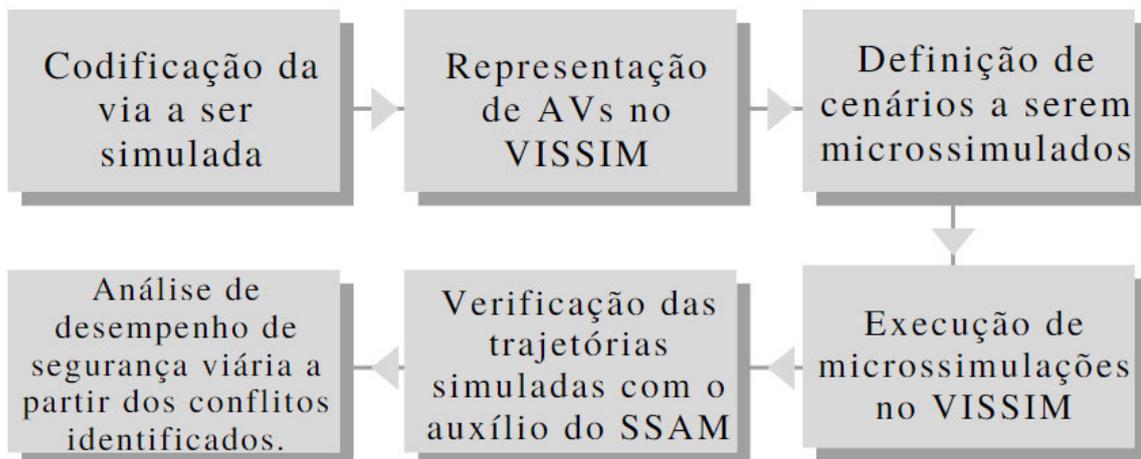
O estudo de Morando *et al.* (2018) investiga o impacto de AVs na segurança viária em dois estudos de caso: um cruzamento sinalizado e uma rotatória, sob várias taxas de penetração AV. Os resultados sugerem que os AVs melhoram a segurança significativamente com altas taxas de penetração, mesmo quando viajam com headways mais curtos para melhorar a capacidade da estrada e reduzir o atraso. Para a intersecção sinalizada, AVs reduzem o número de conflitos em 20% a 65% com as taxas de penetração AV entre 50% e 100%. Para a rotatória, o número de conflitos é reduzido de 29% a 64% com a taxa de penetração AV de 100%.

Cada um desses estudos utilizou uma maneira diferenciada de representar a automação ou a conectividade em veículos, dessa forma percebe-se que ainda há uma grande dificuldade em padronizar a caracterização de AVs e CVs em uma microssimulação. Porém, mesmo com essa variabilidade nas representações, nota-se uma tendência em todos os trabalhos de melhoria na segurança viária a medida que os veículos autônomos ganhem maior participação nas vias.

3 MÉTODO

Neste capítulo serão tratadas as etapas metodológicas adotadas neste estudo, as quais estão representadas no fluxograma da Figura 4. Será detalhado o processo de modelagem da rede, de representação dos AVs no microssimulador, de definição de cenários a serem observados e de avaliação das trajetórias simuladas.

Figura 4 – Metodologia adotada.



Fonte: A autora.

3.1 Codificação da Rede

O objetivo deste trabalho é analisar o comportamento de AVs em ambiente urbano, ou seja, com fluxo interrompido, mais especificamente em uma via arterial representativa da realidade de uma capital brasileira. Optou-se por utilizar a Av. Santos Dumont para realizar as análises, localizada no município de Fortaleza, uma via arterial unidirecional com duas faixas de tráfego misto que se encontra numa das regiões mais adensadas da cidade, com uso do solo predominantemente comercial. É válido destacar que a escolha da via foi baseada em optar por uma que já estivesse previamente calibrada, uma vez que o processo de calibração exige um esforço significativo e seu procedimento não se caracteriza como objetivo deste trabalho. Todas as etapas de modelagem, calibração e validação da via foram anteriormente executadas por Lacerda (2016), e a rede foi disponibilizada para a realização deste trabalho. A Seção 3.1 trará resumidamente uma descrição da metodologia adotada por Lacerda (2016) para breve compreensão das etapas de modelagem, calibração e validação da via.

3.1.1 Modelagem da Avenida Santos Dumont

O trecho escolhido da Av. Santos Dumont possui 1,2km de extensão e é composto por nove interseções, sendo cinco delas semaforizadas, e é compreendido entre a Rua João Cordeiro e a Av. Barão de Studart. A Figura 5 apresenta uma imagem da localização do trecho escolhido da Av. Santos Dumont, detalhando os sentidos dos fluxos e quais as interseções são semaforizadas. A divisão da via em dois trechos teve como objetivo facilitar o processo de calibração.

Figura 5 – Corredor arterial Av. Santos Dumont.



Fonte: Lacerda (2016).

Para a codificação da rede no microssimulador VISSIM, o trabalho de Lacerda (2016) coletou dados de demanda veicular, de tempos semafóricos, de linhas de transporte público e de heaways entre elas e, por fim, de características físicas da via, como largura de faixas e posição dos pontos de parada.

Os dados de demanda veicular direcional foram coletados através de contadores manuais, em todas as interseções do corredor escolhido, com períodos de agregação de 15 minutos (LACERDA, 2016). A coleta foi realizada durante uma hora, no período da manhã, a partir de 7h, de uma quarta-feira, dia 30 de abril de 2014. Além dos contadores manuais para os volumes direcionais, foram realizadas contagens classificatórias através de câmeras posicionadas em pontos específicos ao longo do trecho definido. A Figura 6 apresenta os resultados obtidos.

O trabalho de Lacerda (2016) obteve dados de programação semafórica das cinco

Figura 6 – Volumes coletados Av. Santos Dumont.



Fonte: Lacerda (2016).

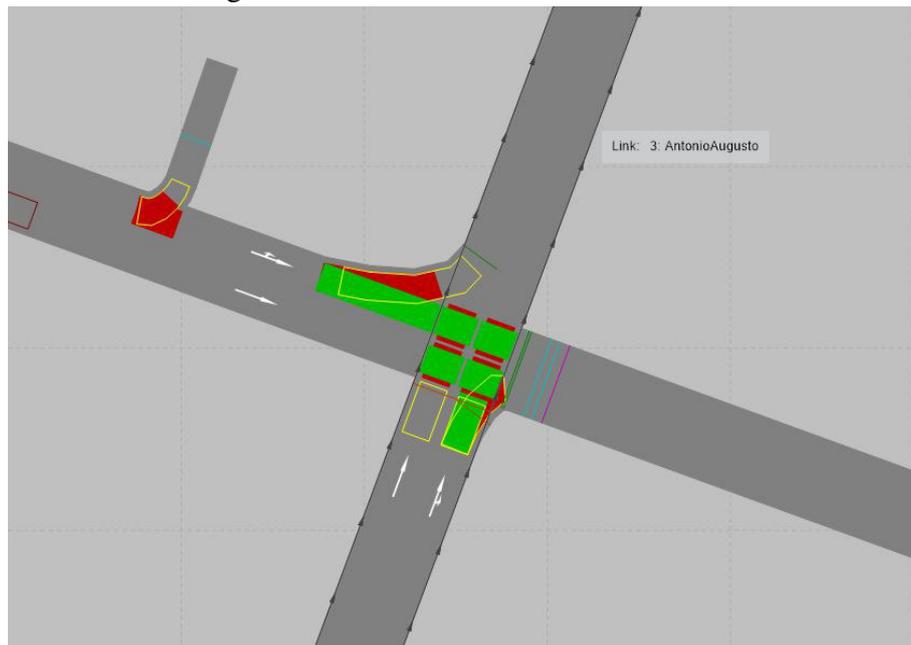
interseções junto ao Controle de Tráfego em Área de Fortaleza (CTAFOR), os quais continham todas as informações de repartições de verde, ciclos semafóricos, diagrama de estágios e defasagens entre os semáforos. Todos os cinco semáforos foram inseridos no VISSIM como sendo do tipo fixo, ou seja, não variam seus ciclos de acordo com a demanda veicular dentro do período simulado.

Em relação ao transporte público, foram identificados quatro pontos de parada de ônibus, e a Empresa de Transporte Urbano de Fortaleza (ETUFOR) forneceu dados de headways e de rotas dos coletivos, os quais são fundamentais para a codificação da rede. Observou-se que todas as linhas de transporte público estão localizadas no próprio corredor arterial, percorrendo todo o trecho escolhido, e a avenida conta com 10 linhas, resultando num headway médio de 1min e 18s, o que corresponde à cerca de 42 ônibus/hora (LACERDA, 2016).

Por fim, foram utilizadas funcionalidades do VISSIM que tornam o comportamento dos veículos simulados mais semelhante ao que ocorre na realidade: *reduced speed areas* e *conflict areas*. A primeira foi aplicada em todas as conversões entre os *links* e serve para que o veículo possa executar a manobra de forma segura, reduzindo sua velocidade até a indicada na área. Adotou-se uma velocidade de 20km/h para as conversões. Ela está representada na Figura 7 pelo contorno amarelo que interliga os *links*. Já o *conflict areas* foi utilizado para indicar quem tem a preferencial em regiões que dois sentidos de fluxo se interpõem, e sua aplicação principal ocorreu nas interseções não semaforizadas, em que é preciso enfatizar para microssimulador

qual *link* possui preferencial. A Figura 7 apresenta uma aplicação dessa funcionalidade em um cruzamento não semaforizado entre a Avenida Santos Dumont e a Rua Antônio Augusto. O sentido do fluxo da Avenida está preferencial, uma vez que está representado pela cor verde, e, dessa forma, os veículos vindos da Rua Antônio Augusto ao chegarem nessa região conflitante irão aguardar uma brecha aceitável para prosseguirem sua trajetória.

Figura 7 – Interseção não semaforizada entre a Av. Santos Dumont e a Rua Antônio Augusto



Fonte: A autora.

3.1.2 Calibração e Validação

3.1.2.1 Análise de sensibilidade dos parâmetros nas medidas de desempenho

Anteriormente ao processo de calibração da via, Lacerda (2016) verificou o efeito de parâmetros dos modelos comportamentais adotados pelo VISSIM nas medidas de desempenho velocidade média por trecho e atraso nas interseções, uma vez que seu trabalho focava em avaliação da fluidez de tráfego urbano. A Análise de Sensibilidade foi realizada de acordo com os parâmetros dos modelos de Wiedemann 74 (W74), Wiedemann 99 (W99), demais parâmetros de *car-following*, modelo de *lane-changing*, modelo de *lateral movements* e modelos de *gap-acceptance*. O objetivo foi definir quais parâmetros trariam melhorias para a representatividade da via ao serem calibrados.

Em relação ao modelo de *car-following*, Lacerda (2016) verificou que os parâmetros

de Wiedemann 99 não trouxeram grandes contribuições para estimação de tempos de viagem e atraso em interseções. Dessa forma, embora o modelo de Wiedemann 99 tenha maior capacidade de representação, uma vez que possui mais parâmetros em quantidade, o esforço para calibração deles não iria compensar, uma vez que não exerceram grande influência nas medidas de desempenho. Dessa forma, adotou-se o modelo de Wiedemann 74, o qual possui apenas três parâmetros: ax , bx_add e bx_mult . Já os demais parâmetros de car-following, apenas o *Duration Temporary lack of attention* e o *Frequency Temp. lack of attention* exerceram impacto significativo. Ao analisar os parâmetros de *lane-changing*, Lacerda (2016) constatou que apenas o *advanced merging*, o *min. headway front/rear* e o *safety distance reduced factor* possuíam impacto. Todos os outros parâmetros dos demais modelos não apresentaram impacto considerável.

3.1.2.2 Processo de calibração

É importante destacar que a divisão da avenida em dois subtrechos, como mostra a Figura 5, foi necessária para divisão dos dados utilizados na calibração e na validação. A etapa de calibração utilizou dados do subtrecho 2 (trecho entre a R. Carlos Vasconcelos e Av. Br. de Studart) e a validação, do subtrecho 1 (trecho entre a R. João Cordeiro e R. Carlos Vasconcelos).

Para calibração dos parâmetros escolhidos, Lacerda (2016) definiu cenários com diferentes configurações de metodologia, para compará-las e poder escolher aquela que apresentasse menores erros entre valores de medida de desempenho coletados e simulados. Cada cenário definia uma estratégia de calibração, variando entre valores *default*, valores calibrados manualmente e valores calibrados por algoritmo genético. Ao todo foram definidos 6 cenários, e o Erro Percentual Absoluto Médio (EPAM) deles variou de 6% a 13,1%. O EPAM de 6% foi do cenário base, o qual calibrou manualmente a velocidade desejada e os parâmetros ax , bx_add e bx_mult , e utilizou valores *default* para os demais parâmetros (os relacionados ao *lack of attention*, o *min. headway front/rear* e o *safety distance reduced factor*). Ao adicionar mais parâmetros a serem calibrados, seja manualmente seja pelo AG, aumentou-se o EPAM dos cenários, distanciando-os da situação verificada em campo.

3.1.2.3 Processo de validação

A etapa de validação utilizou os dados do trecho 1 da Av. Santos Dumont, como citado anteriormente, e foram realizadas 30 simulações para os cenários da rede com todos os parâmetros com valores em *default*, a rede com 4 parâmetros calibrados manualmente (velocidade

desejada, ax , bx_add e bx_mult) e os demais *default* e, por fim, o cenário com os mesmos 4 parâmetros calibrados manualmente e os 4 demais calibrados com o AG.

A validação com os parâmetros velocidade desejada, ax , bx_add e bx_mult calibrados manualmente e os demais *default* apresentou um EPAM de 3,2%, considerado muito bom para a análise. De acordo com os resultados, ao inserir os 4 parâmetros a mais do AG, o erro aumentou de 3,2% para 18,6%, assim como ocorreu na etapa de calibração, passando de 6% para 10,31%. Após a verificação do menor erro entre os cenários simulados, adotaram-se os valores apresentados abaixo na Tabela 5 para os parâmetros considerados.

Tabela 5 – Valores dos parâmetros dos modelos do VISSIM calibrados e validados.

Parâmetros calibrados	
Velocidade Desejada	50
ax	2,2
bx_add	5,0
bx_mult	5,0
<i>Dur. Lack of attention</i>	0,0
<i>Prob. Lack of attention</i>	0,00%
<i>Min. Headway front/rear</i>	0,5
<i>Safety Dist. Reduc. Factor</i>	0,6

Fonte: Lacerda (2016)

3.1.2.4 Adaptações na calibração

Uma vez que Lacerda (2016) calibrou os parâmetros do VISSIM focando em medidas de desempenho de fluidez de tráfego, não considerando o desempenho de segurança viária, é relevante citar que algumas alterações nessa calibração foram assumidas para este trabalho. Julgou-se necessário inserir valores em parâmetros que representassem erro de condução para os veículos convencionais que fosse capaz de representar o lapso de atenção dos condutores, situação responsável por quase 80% de acidentes viários fatais (GOPAL *et al.*, 2020). Foi necessário adaptar os valores calibrados por Lacerda (2016) de *Dur. Lack of attention* e de *Prob. Lack of attention*, e, além disso, também foram definidos valores para os parâmetros *Distraction probability* e *Distraction duration distribution*, os quais ainda não estavam presentes no VISSIM quando Lacerda modelou a via.

Os parâmetros de *lack of attention*, ou seja, de falta de atenção, representam o veículo que não reage aos veículos que o precedem. O manual do software (PTV, 2020) indica que esse parâmetro é a probabilidade do motorista dormir durante a condução e o período de tempo que ele vai perder a consciência pelo sono. Já os parâmetros de *distraction*, ou seja, de distração,

representam o desvio lateral da trajetória do veículo devido ao seu lapso de atenção. Durante esse período, o veículo ignora todos os outros veículos e objetos de rede, como semáforos, regras de prioridade, áreas de conflito e sinais de parada. É relevante citar que caso o *driving behaviour* de veículos em vias adjacentes não selecionar o parâmetro *Observe adjacent lanes*, os mesmos vão ignorar completamente o desvio lateral do veículo distraído, e ele será tratado como se ainda estivesse em sua pista.

Para o *Dur. Lack of attention* adotou-se 1s de duração, que é o valor máximo indicado pelo manual do VISSIM (PTV, 2020) e é utilizado para representar condutores experientes (ULAK *et al.*, 2019). O *Prob. Lack of attention* foi estabelecido como 10%, um valor um pouco abaixo da média entre probabilidade de distração de jovens, 25%, e de condutores experientes, 5% (ULAK *et al.*, 2019). Para o *Distraction probability* adotou-se o mesmo valor de probabilidade de 10%, e para o *Distraction duration distribution* definiu-se uma média de 4,6s de tempo de distração, o qual é o tempo médio que um condutor leva para enviar ou ler uma mensagem de texto (NATIONAL TRAFFIC LAW CENTER, 2017).

Por fim, também foi considerada outra adaptação na calibração de Lacerda (2016) para representar a lenta recuperação de veículos convencionais após paralisação completa do tráfego, recorrente em fluxo interrompido. Para isso foi selecionado o modo de recuperação lenta, *Recovery slow*, e foram utilizados os valores *default* sugeridos pelo VISSIM (PTV, 2020) para *Recovery acceleration*, *Recovery distance*, *Recovery threshold speed* e *Recovery safety distance*, parâmetros descritos na Tabela 6 abaixo.

Tabela 6 – Parâmetros de *Slow Recovery* e valores adotados

Parâmetro	Descrição
<i>Recovery acceleration</i>	Porcentagem da aceleração normal usada durante a recuperação lenta. Valor <i>default</i> de 40%.
<i>Recovery distance</i>	Distância máxima de impacto de recuperação lenta do último local de tráfego total parado. Valor <i>default</i> de 2000 m.
<i>Recovery threshold speed</i>	Limite de velocidade abaixo do qual o VISSIM detecta tráfego total parado. O valor <i>default</i> é 60% da velocidade desejada.
<i>Recovery safety distance</i>	Porcentagem da distância de segurança normal usada durante a recuperação lenta. Valor <i>default</i> de 110%.

Fonte: Adaptado de PTV (2020)

3.2 Representação de Veículos Autônomos no VISSIM

Esta seção aborda o processo de representação de veículos autônomos no microssimulador VISSIM, detalhando as principais mudanças numéricas de parâmetros adotadas neste trabalho. Inicialmente serão apresentados os modos de condução de AVs escolhidos para serem simulados. Em seguida, serão apresentados em detalhes os parâmetros modificados nos modelos do VISSIM para representar cada um dos modos de condução adotados, identificando, ainda, as novas funcionalidades no VISSIM para representar AVs.

3.2.1 Modos de condução de AV

Como citado anteriormente, este trabalho optou pelo microssimulador VISSIM para realizar o estudo do impacto de AVs, o qual atualmente se encontra na versão 20. Todas as simulações executadas foram feitas nessa versão, a qual já possui disponíveis os três últimos sistemas de navegação definidos pelo projeto CoExist (SUKENNIK, P., 2018) e apresentados na Tabela 3.

Ao analisar as características de cada um dos quatro modos de condução do CoExist, *rail safe*, cauteloso, normal e *all knowing*, assumiu-se que o condutor brasileiro, caracterizado por um comportamento mais agressivo se comparado a outros países (CALEFFI *et al.*, 2017), dificilmente optaria pelo modo de condução *rail safe* por esse adotar um comportamento excessivamente cauteloso, não possibilitando, por exemplo, ultrapassagem para atingir uma velocidade desejada definida. Além disso, foi definido que este trabalho iria avaliar o impacto apenas dos modos de condução extremos, seja no sentido agressivo, seja no sentido cauteloso. Uma vez que o *rail safe* foi desconsiderado, foram escolhidos os modos cauteloso e *all knowing*, aqui nomeado de agressivo.

3.2.2 Atualizações do VISSIM dedicadas aos AVs

O VISSIM disponibiliza desde a sua 11^a versão novos parâmetros que foram desenvolvidos para possibilitar uma melhor representação de AVs em uma microssimulação, os quais estão em destaque na Figura 8.

Figura 8 – Novas funcionalidades do VISSIM adaptadas para representar AVs

Fonte: SUKENNIK, P. (2018)

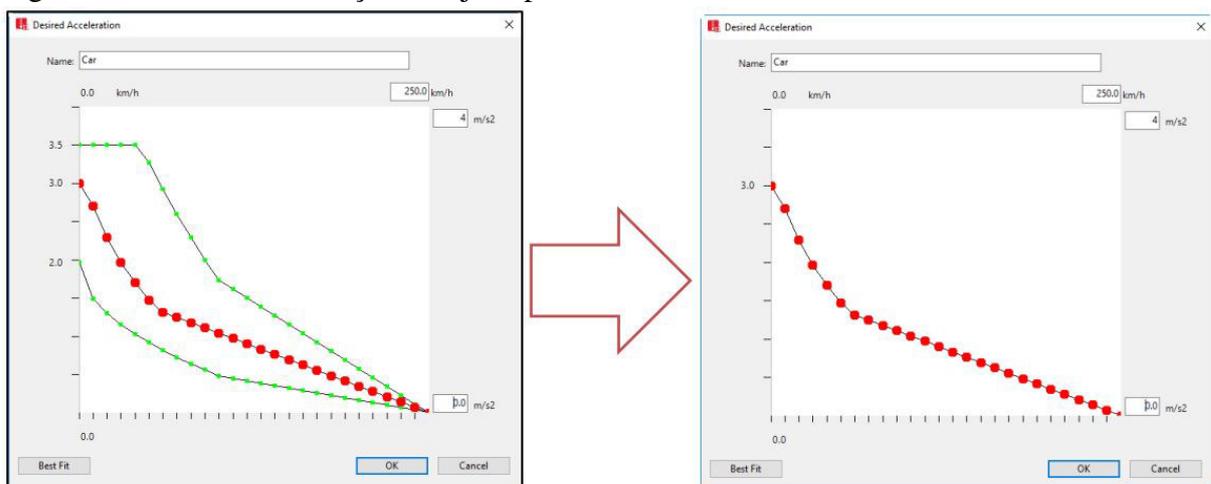
O parâmetro *number of interaction objects* (NIO) refere-se ao número máximo de objetos observados pelo veículo, os quais podem ser outros veículos ou objetos internos (áreas de velocidade reduzida, sinais de parada ou regras de prioridade). Já o parâmetro *number of interaction vehicles* (NIV) refere-se apenas à percepção de demais veículos. Adotou-se um NIO de 2 e NIV de 1 para AVs do tipo cautelosos. Já para os AVs agressivos, adotou-se NIO de 10 e NIV de 8. Esses valores foram indicados pelo manual do software (PTV, 2020).

Já o parâmetro *enforce absolute braking distance* possibilita que o veículo sempre se certifique de que pode frear sem uma colisão, mesmo se o veículo da frente parar subitamente. Por caracterizar um comportamento extremamente cauteloso, foi utilizado apenas para AVs cautelosos.

3.2.3 Comportamento determinístico

O comportamento de veículos autônomos segue um padrão determinístico, diferentemente do estocástico adotado por veículos convencionais. Para representar esse padrão, serão alterados os parâmetros que influenciam o comportamento estocástico implicitamente e explicitamente. Desde a versão 11, o VISSIM possibilita que o usuário desabilite a função *Implicit stochastic*, indicado na Figura 8, que antes era imposta a todos os veículos simulados e não podia ser alterada. Além disso, os parâmetros de influência explícita são definidos por funções e distribuições que o usuário pode alterar diretamente. As funções alteradas foram as de valores máximos e desejados de aceleração e de desaceleração. Em cada uma das quatro funções, igualou-se as curvas de valores máximos e mínimos do eixo y para a curva média, impossibilitando a variação comportamental entre os AVs. A Figura 9 abaixo representa a alteração aplicada para a função de aceleração desejada, e o mesmo procedimento foi adotado para as demais funções.

Figura 9 – Curva de aceleração desejada para AVs.



Fonte: SUKENNIK, P. (2018)

Além dessas funções, também foi alterada a distribuição de velocidade desejada, a qual indica a velocidade que o veículo deseja assumir. A velocidade real é o resultado da interação com outros motoristas e objetos na simulação, e cada veículo recebe uma velocidade individual desejada de uma distribuição. Para veículos convencionais, uma grande variedade de velocidades desejadas pode ser observada. No entanto, os veículos autônomos podem operar com uma variação muito menor porque provavelmente obedecem aos limites de velocidade. Portanto, os AVs terão distribuições de velocidade desejadas diferentes dos veículos convencionais. O

manual do VISSIM (PTV, 2020) indica variações de até 2km/h para a velocidade desejada de AVs, portanto, foi adotado um valor médio de 50km/h variando entre 48km/h e 52km/h.

3.2.4 *Driving behaviours*

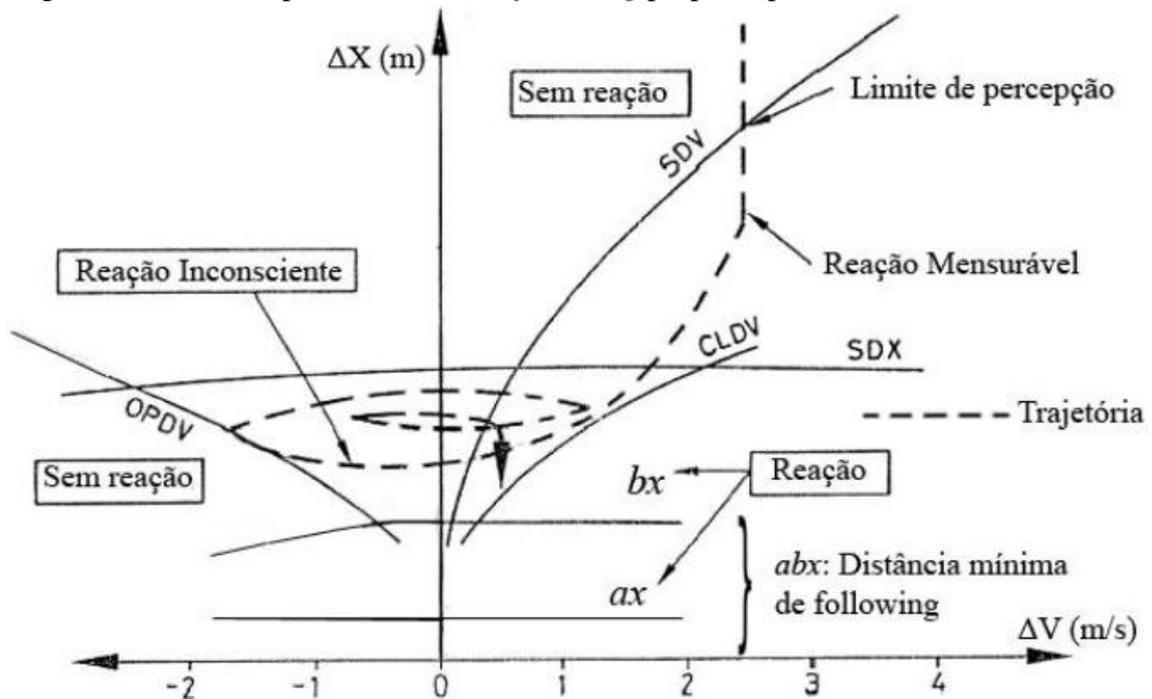
Foi necessário criar dois novos tipos de veículos e duas novas classes correspondentes para representar cada modo de condução, cauteloso e agressivo. Essa diferenciação ocorreu para que as funções e as distribuições criadas para AVs, detalhadas na seção 3.2.3, pudessem ser atribuídas a um tipo de veículo diferente do convencional.

A partir da criação das classes de veículos "AV Cauteloso" e "AV Agressivo", foi possível estabelecer um comportamento de direção para cada uma. A criação de um *driving behaviour* exige que sejam estabelecidos valores para os parâmetros dos diferentes modelos comportamentais inseridos no VISSIM, e, neste trabalho, serão incluídos os valores indicados pelo CoExist (SUKENNIK, P., 2018) para representar os AVs cautelosos e agressivos no seu comportamento de *car following* e de *lane changing*.

O VISSIM possui dois modelos que representam o comportamento de *following*, baseados no trabalho de Wiedemann (1974), os quais são: o modelo de Wiedmann74 (W74) e o de Wiedemann99 (W99). O conceito básico destes modelos é que o motorista de um veículo em movimento mais rápido começa a desacelerar à medida que atinge seu limite de percepção individual para um veículo em movimento mais lento. Uma vez que ele não pode determinar exatamente a velocidade desse veículo, sua velocidade cairá abaixo da velocidade desse veículo até que ele comece a acelerar ligeiramente novamente após atingir outro limite de percepção. Há uma ligeira e constante aceleração e desaceleração. A Figura 10 indica o comportamento gráfico do modelo, com os limites de percepção indicados.

Wiedemann (1974) indica que existem quatro estágios de condução para um veículo, os quais são: condução livre, condução de aproximação, condução de seguidor e condução de frenagem. O estágio de condução livre ocorre quando o veículo seguidor não sofre influência de veículos a sua frente. O motorista busca atingir e manter a velocidade desejada, que na prática não se mantém constante. No estágio de condução de aproximação, ocorre o processo de adaptação da velocidade do motorista seguidor a velocidades menores impostas por veículos mais lentos a sua frente. O motorista seguidor aplica uma desaceleração para igualar a sua velocidade à do veículo à frente no instante que atinge sua distância de segurança desejada. No estágio de condução de seguidor, o motorista segue o veículo à frente sem consciência de aceleração

Figura 10 – Modelo psicofísico de *car following* proposto por Wiedemann



Fonte: Lacerda (2016)

ou desaceleração, buscando manter relativamente constante uma distância considerada segura. A diferença de velocidades entre os veículos oscila em torno de zero. Por fim, a condução de frenagem só ocorre se há imposição de taxas de desaceleração médias ou altas quando a distância do veículo à frente fica muito abaixo da considerada segura pelo condutor.

A diferenciação entre os modelos W74 e W99 consiste no nível de detalhamento para calibração do tráfego, pois enquanto W74 possui três parâmetros (a_x , b_{x_add} e b_{x_mult}), W99 possui dez (CC0 até CC9). O manual do software (PTV, 2020) indica o primeiro modelo para simulação de ambiente urbano e o segundo para simulação de ambiente rodoviário. Como a seção 3.1 indicou, adotou-se a calibração realizada pelo trabalho de Lacerda (2016) para veículos convencionais, o qual optou pelo modelo W74 de *car following*. Contudo, para os AVs optou-se pelo modelo W99, mesmo que em ambiente urbano, pois, como indica Sukennik (2018), é possível representar mais detalhadamente o comportamento do AV. Como dito anteriormente, os parâmetros desse modelo vão do CC0 ao CC9, e seus significados estão descritos a seguir.

- CC0: Distância desejada de parada entre veículos parados;
- CC1: Tempo de *headway* (*gap*), em segundos, igual ao tempo para manter um espaçamento desejado do veículo à frente;
- CC2: Variação de *following*, isto é, a oscilação longitudinal, ou o quanto mais de distância além da distância desejada de segurança o motorista permite do veículo à frente;

- CC3: Espaçamento para entrar em *following*, que representa o controle do começo do processo de desaceleração, quando o motorista reconhece um veículo mais lento a sua frente;
- CC4 e CC5: Limites negativo e positivo do *following*, os quais controlam a diferença de velocidades durante o estado de *following*;
- CC6: velocidade dependente da oscilação, que busca representar a influência da distância na oscilação da velocidade dos veículos em *following*;
- CC7: oscilação de aceleração real;
- CC8: aceleração quando parado, igual à aceleração desejada de um veículo quando estiver começando a se movimentar a partir da situação parada;
- CC9: aceleração a 80 km/h (limitada pela máxima aceleração definida nas curvas de aceleração).

Os valores adotados para esses parâmetros em cada um dos modos de condução, cauteloso e agressivo, encontram-se na Tabela 7, e foram indicados pelo projeto CoExist, o qual realizou uma coleta de dados em ambiente de tráfego real em uma pista de testes, em Helmond (Holanda) e foram identificados oito casos de estudos na Europa. Foram estudados dois AVs, equipados com controle de cruzeiro avançado cooperativo seguindo um carro convencional para diferentes cenários. Os testes foram simulados comparando os resultados do modelo e realizando as modificações necessárias. A partir desse processo, o comportamento dos AVs foi validado e seus parâmetros foram adicionados aos recursos do VISSIM 11 (DAHL *et al.*, 2018). Para fins comparativos, também foram apresentados na Tabela 7 os valores *default* sugeridos pelo VISSIM para simulação de veículos convencionais.

Tabela 7 – Parâmetros de *car following* W99 para representar AVs indicados pelo CoExist

Parâmetro	AV Cauteloso	AV Agressivo	Valor default
CC0 (m)	1,5	1,0	1,5
CC1 (s)	1,5	0,6	0,9
CC2 (m)	0	0	4
CC3 (s)	-10	-6	-8
CC4 (m/s)	-0,1	-0,1	-0,35
CC5 (m/s)	0,1	0,1	0,35
CC6 (10 ⁻⁴)rad/s)	0	0	11,44
CC7 (m/s)	0,1	0,1	0,25
CC8 (m/s)	3	4	3,5
CC9 (m/s)	1,2	2	1,5

Fonte: Adaptado de SUKENNIK, P. (2018)

Para o comportamento de mudança de faixa, o parâmetro com maior relevância para a representação de AVs no VISSIM é o *Safety distance reduction factor*, o qual se refere a um fator que reduz a distância de segurança adotada por determinado veículo durante seu processo de mudança de faixa. Ele possui valor *default* de 0,6, ou seja, diminui 40% da distância de segurança original. Quanto menor esse fator, mais arriscado será o movimento da mudança de faixa, uma vez que os veículos ficarão mais próximos. De acordo com Sukennik (2018), para veículos do tipo AV Cauteloso indica-se um *Safety distance reduction factor* de 1, com a obrigatoriedade de ativar o recurso de *enforce absolute breaking distance*; para veículos do tipo AV Agressivo, indica-se um valor de 0,5.

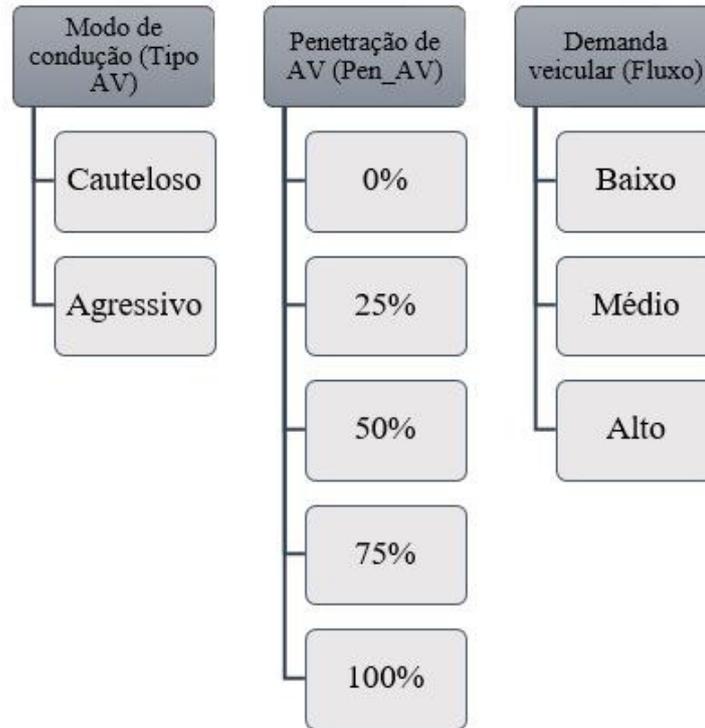
3.3 Cenários de simulação

Este trabalho tem como objetivos específicos verificar de que forma diferentes taxas de penetração de AVs e diferentes demandas veiculares afetam as interações entre AVs e veículos convencionais no aspecto de segurança viária. Essa análise pode ajudar a compreender os possíveis impactos do chamado período de transição para automação completa das vias, onde veículos convencionais e autônomos compartilharão infraestrutura e estarão transicionando sua participação na demanda do tráfego. Assim, para possibilitar esse estudo serão definidos cenários a serem microssimulados no VISSIM, e a partir de uma análise estatística dos resultados obtidos será possível compreender os efeitos de cada variável controlável estabelecida no âmbito da segurança das vias.

Como citado anteriormente, serão avaliados os impactos de dois diferentes modos de navegação que podem ser optados pelo usuário do AV, os quais são AV Cauteloso e AV Agressivo. Essa escolha objetiva compreender como o nível de agressividade do veículo autônomo impacta na frequência e na severidade de conflitos veiculares. Em relação à penetração de cada um desses tipos de AVs, foram definidos cinco cenários a serem comparados, desde o base, onde a participação de AVs é nula, até o de automação total, incluindo os intermediários de tráfego misto com penetração de AV de 25%, 50% e 75%.

Por fim, estabeleceram-se três níveis de demanda veicular para compor os diferentes cenários simulados: demanda alta, média e baixa. Cada um desses valores corresponde a uma porcentagem da demanda de hora-pico observada por Lacerda (2016) na Av. Santos Dumont, sendo a alta demanda 90%, a média 50% e a baixa apenas 25%. A Figura 11 apresenta um resumo de todas as variáveis controláveis definidas para a montagem dos cenários.

Figura 11 – Detalhamento das variáveis de controle definidas para compor os cenários de simulação



Fonte: A autora

É importante destacar que os dois tipos de AVs, cauteloso e agressivo, foram analisados individualmente, ou seja, para cada combinação de penetração de AV e demanda veicular foram criados dois cenários: um para AV cauteloso e outro para AV agressivo. Dessa forma, foram estabelecidos 27 cenários a serem simulados no VISSIM, sendo 3 cenários bases, ou seja, sem AVs, 12 cenários para AVs cautelosos e 12 cenários para AV agressivos.

Cada um dos 27 cenários definidos foi simulado trinta vezes, com duração de uma hora e cinco minutos de simulação. Os primeiros cinco minutos de cada simulação foi excluído dos resultados, considerado o período de *warm-up* da rede. Dessa forma, foram executadas 810 simulações no total, com uma duração real de aproximadamente sete horas de simulação.

3.4 Análise de variância entre cenários

A etapa final é definida pela análise comparativa dos dados de conflitos obtidos a partir do processamento dos arquivos de trajetórias dos modelos simulados pelo SSAM. O número total de conflitos observado em cada cenário é a variável de resposta da análise de variância (ANOVA) a ser executada entre os cenários.

Por meio da ANOVA é possível avaliar a significância estatística das diferenças entre

grupos de diversos fatores controláveis, no caso deste trabalho serão o nível de penetração de AV, a demanda veicular e o modo de condução, detalhados na Figura 11, e o efeito de suas interações em uma única análise. A ANOVA exige como premissa que exista uma distribuição normal do efeito do conjunto das variáveis de resposta, a homogeneidade dos grupos (aleatoriedade dos erros) e a independência estatística dos fatores controláveis (ortogonalidade). Não respeitar essas restrições afeta severamente a validade estatística da análise (HAIR *et al.*, 2009).

Para a análise de variância, parte-se das seguintes hipóteses que devem ser respondidas ao final da análise estatística (MONTGOMERY, 1991):

- H0: não há diferenças significativas entre os grupos;
- H1: há diferenças significativas entre os grupos, provocada pelo fator controlável investigado.

As hipóteses buscam responder se os grupos, isto é, a combinação de diferentes níveis dos fatores controláveis provoca mudanças nas variáveis de resposta, as quais são as medidas de desempenho que desejam ser avaliadas no sistema. A ANOVA compara a variância entre as médias de grupos versus a variância dentro dos grupos como uma maneira de determinar se os grupos são todos parte de uma população maior ou populações distintas com características diferentes.

Para este projeto, foi definido realizar uma análise de variância dos efeitos dos fatores controláveis sobre as variáveis de resposta, considerando um intervalo de confiança de 95%, isto é, $\alpha \leq 0,05$.

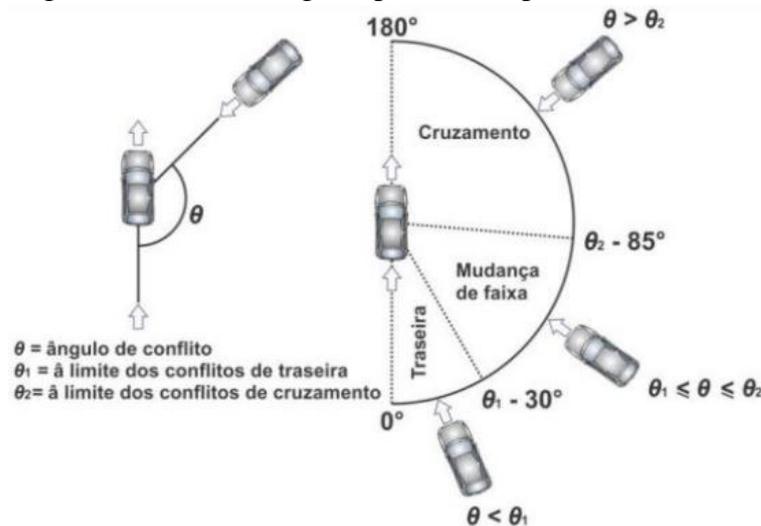
3.5 Escolha de indicadores *proxy* para avaliar a segurança viária

As variáveis de controle definidas na seção anterior serão avaliadas com base na variável de resposta "número total de conflitos", uma vez que este trabalho tem como objetivo avaliar a frequência e a severidade de conflitos veiculares entre AVs e veículos convencionais.

Como ainda não é possível verificar o número de conflitos gerados em cada simulação no próprio microssimulador VISSIM, será utilizado o *Surrogate Safety Assessment Model*. O SSAM é um aplicativo capaz de detectar e classificar conflitos veiculares a partir de dados de trajetória de veículos exportados de uma microssimulação. Para essa análise, o software pede que sejam estabelecidos limites numéricos para os indicadores *proxy* de tempo para colisão e de tempo pós-invasão, e dois limites de angulação que diferenciem os três possíveis tipos de conflitos que poderão ocorrer: longitudinal, ou *rear end*, de cruzamento ou de mudança de faixa.

A Figura 12 apresenta a disposição angular entre os veículos em cada tipo de conflito.

Figura 12 – Limite angular para cada tipo de conflito



Fonte: Sousa (2012)

O SSAM calcula uma série de indicadores de conflito de tráfego, sendo os mais utilizados em análises de segurança viária apresentados a seguir (FHWA, 2008):

1. TTC: É o menor valor do tempo-para-colisão, em segundos, observado durante o conflito. Esta estimativa é baseada na atual localização, velocidade e trajetória futura dos dois veículos em dado instante. O valor de TTC é definido a cada passo de tempo durante o evento conflituoso. O evento de conflito é concluído depois que o valor de TCC ultrapassa o valor limite crítico.
2. PET: É o menor “tempo após a invasão” observado durante o conflito, em segundos. O tempo após a invasão é o tempo decorrido entre o primeiro veículo envolvido no conflito deixar de ocupar determinada posição e o segundo veículo chegar a tal posição. Um valor de zero indica uma colisão, uma vez que ambos veículos ocuparam o mesmo lugar no espaço ao mesmo tempo.
3. MaxS: É a velocidade máxima de qualquer um dos veículos envolvidos no conflito (enquanto o TTC está abaixo do limite estabelecido).
4. DeltaS: É a diferença de velocidade entre veículos observada no tMinTTC. Mais precisamente, esse valor é matematicamente definido como o módulo da diferença entre as velocidades dos veículos (ou trajetórias).
5. DR: É a taxa inicial de desaceleração do segundo veículo, gravada como a taxa de aceleração instantânea. Se o veículo freia (reage), este é o primeiro valor de aceleração negativa observado durante o conflito. Se o veículo não freia, esse é o menor valor de

aceleração observado durante o conflito.

6. MaxD: É a desaceleração máxima do segundo veículo, registrada como a taxa de aceleração instantânea mínima observada durante o conflito. Um valor negativo indica desaceleração (travagem ou liberação do pedal do acelerador). Um valor positivo indica que o veículo não desacelerou durante o conflito.
7. MaxDeltaV: É o valor máximo de DeltaV observado em qualquer um dos veículos envolvidos no conflito. O DeltaV é a mudança na alteração da velocidade do conflito, (obtido através da velocidade do veículo registrada no instante do mínimo TTC e do heading) e pela velocidade de pós-colisão calculada.

Os valores *default* do software para TTC máximo e PET máximo são de, respectivamente, 1,5s e 5s. É importante calibrar o modelo no SSAM para que a análise e a identificação de eventos que seriam considerados conflitos para a frota convencional tenham validade com as métricas fornecidas pelo simulador para o local de estudo. Por essa razão, este trabalho optou por utilizar um valor máximo de TTC baseado na calibração executada por Caleffi *et al.* (2017), a qual forneceu um valor máximo de TTC de 3,6s. Para essa calibração, Caleffi *et al.* (2017) coletou dados de trajetória dos veículos e identificou os eventos de conflitos em campo por meio de técnicas semiautomáticas de visão computacional. Os conflitos de tráfego foram extraídos identificando as ações evasivas dos veículos, como freadas, mudanças de direção e desaceleração dos veículos, e foi identificada uma variação entre 0,5s e 3,6s para o TTC.

Em relação aos ângulos de limite entre conflitos, foram utilizados para este estudo valores *default* do SSAM, 30° e 85°. O conjunto desses valores limites de angulação, TTC e PET é responsável por caracterizar um conflito para o software, o qual irá identificar nos arquivos de trajetória da microssimulação eventos que correspondam a esses intervalos.

Wang (2012) aponta que os indicadores *proxy* são diferenciados entre indicadores da severidade do conflito e indicadores da severidade de acidentes que aconteceriam a partir do evento conflituoso. Os indicadores da severidade do conflito incluem TTC, PET e DR, enquanto MaxS e DeltaS são indicadores para determinação da severidade de acidentes que aconteceriam a partir dos conflitos.

Este trabalho optou por comparar os diferentes cenários observando um indicador de severidade de conflito, o TTC, e um indicador de severidade do possível acidente, o MaxS. Para cada par de cenários, os indicadores de segurança são comparados estatisticamente a partir do teste-t de Student, o qual calcula a probabilidade da diferença de duas médias não ser decorrente

do acaso. Neste teste, a hipótese nula (H_0) indica que a diferença entre as médias de duas amostras é 0.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos a partir da aplicação da metodologia descrita no Capítulo 3. O objetivo deste trabalho é de avaliar a frequência e a severidade de conflitos veiculares entre AVs e veículos convencionais, além de verificar como diferentes taxas de penetração de AV e diferentes níveis de demandas veiculares afetam essas interações. Os resultados que embasam a discussão de cada um desses objetivos serão apresentados de acordo com a seguinte ordem: primeiramente serão discutidas as influências de cada fator controlável na variável de resposta de número total de conflitos, e, em seguida, serão caracterizados os tipos de conflitos e a sua severidade.

4.1 Estatística descritiva dos cenários

De acordo com o Capítulo 3, foram executadas 30 simulações para cada um dos 27 cenários definidos a partir das variáveis de controle de demanda veicular, de penetração de AV e de tipo de AV. A Tabela 8 apresenta um resumo com os dados de número de conflito observados para cada cenário simulado.

Observa-se que os cenários simulados com veículos agressivos possuem médias de conflitos maiores que os cenários base e cauteloso, os quais são aproximados entre si. Ao comparar a média das médias entre os três grupos de cenários, base, cauteloso e agressivo, percebe-se que os AVs cautelosos diminuem em 21% o número de conflitos em relação ao cenário base, e os AVs agressivos aumentam em 30% esse número.

4.2 Análise de variância

O objetivo da análise de variância é poder comparar a variável de resposta, número de conflitos, entre as diferentes composições de tráfego, avaliando a influência de cada variável de controle pela análise de variância.

Ao analisar os cenários a partir da ANOVA foi possível considerar o resultado de cada fator isoladamente e também o efeito das interações entre dois fatores. A Tabela 9 apresenta os resultados obtidos, e a última coluna apresenta os p-valores encontrados para um intervalo de confiança igual a 95% ($\alpha \leq 0,05$). A legenda dos nomes atribuídos às variáveis de controle podem ser conferidas na Tabela 8, bem como seus possíveis valores.

Tabela 8 – Estatística descritiva do número de conflitos por cenário

Tipo do AV (Tipo)	Demanda (Fluxo)	Penetração de Avs (Pen_AV)	Média	DesvPad	Máximo	Mínimo
CAUTELOSO	BAIXA	0%	430	35	508	367
	MÉDIA	0%	1368	73	1511	1217
	ALTA	0%	6297	394	6958	5443
	BAIXA	25%	444	36	510	372
		50%	442	37	508	362
		75%	417	36	508	351
		100%	365	37	433	294
	MÉDIA	25%	1458	88	1692	1293
		50%	1447	73	1579	1257
		75%	1351	80	1523	1201
		100%	1169	67	1322	1071
	ALTA	25%	5741	595	6787	4576
50%		4813	336	5562	4153	
75%		4297	226	4967	3883	
100%		3661	280	4738	3261	
AGRESSIVO	BAIXA	25%	650	51	746	548
		50%	759	71	898	629
		75%	771	70	951	632
		100%	697	66	824	572
	MÉDIA	25%	2122	110	2399	1820
		50%	2545	144	2964	2158
		75%	2565	147	2832	2278
		100%	2119	117	2475	1916
	ALTA	25%	7554	670	9568	6188
		50%	7865	391	8601	7038
		75%	7634	339	8531	7049
		100%	6871	286	7445	6286

Fonte: A autora

Tabela 9 – Resultados obtidos na análise de variância

Análise de Variância					
Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Pen_AV	4	9,93E+08	2,48E+08	1,27	0,358
Fluxo	2	1,54E+11	7,70E+10	393,54	0,000
Tipo	1	8,21E+09	8,21E+09	41,97	0,000
Pen_AV*Fluxo	8	1,51E+09	1,89E+08	0,96	0,520
Pen_AV*Tipo	4	2,49E+09	6,24E+08	3,19	0,076
Fluxo*Tipo	2	5,03E+09	2,51E+09	12,84	0,003
Erro	8	1,57E+09	1,96E+08		
Total	29	1,74E+11			

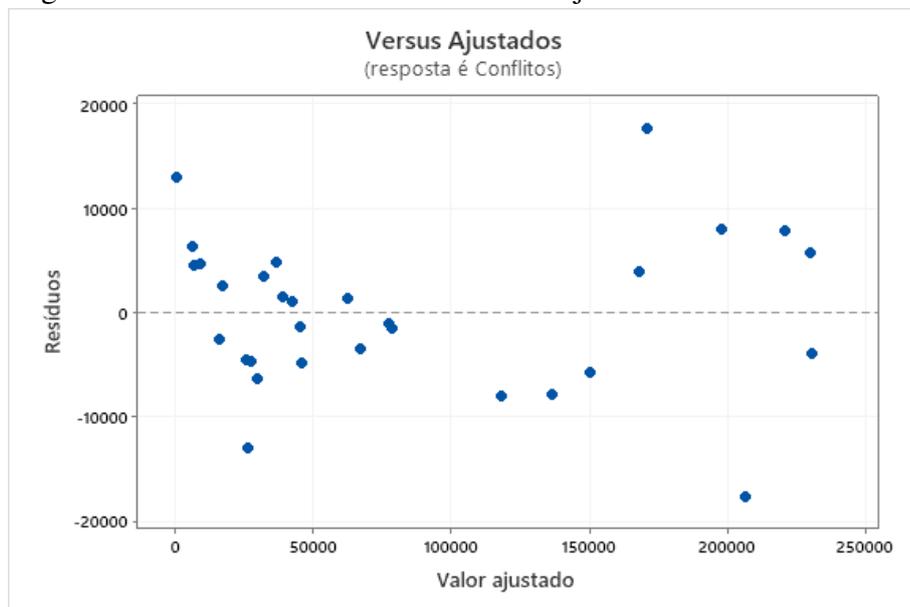
Fonte: A autora

Ao observar a coluna de valores-p é possível concluir que há uma associação estatisticamente significativa entre o número de conflitos e o Fluxo, ou seja, a demanda veicular, o Tipo de AV e a interação entre eles. O efeito do nível de penetração de AV não foi significativo, nem isoladamente nem interagindo com o Fluxo. Apenas a interação com o Tipo de AV apresentou um p-valor aproximado ao nível de significância adotado, mas ainda superior.

4.2.1 Adequação da ANOVA

Os gráficos de resíduos da análise de variância ajudam a determinar se o modelo é adequado e satisfaz aos pressupostos da análise, e são apresentados nas Figuras 13, 14 e 15. O gráfico de resíduos versus ajustes é utilizado para verificar a pressuposição de que os resíduos são aleatoriamente distribuídos e têm variância constante. De maneira ideal, os pontos devem cair aleatoriamente em ambos os lados de 0, sem padrões reconhecíveis nos pontos, como ocorre na Figura 13.

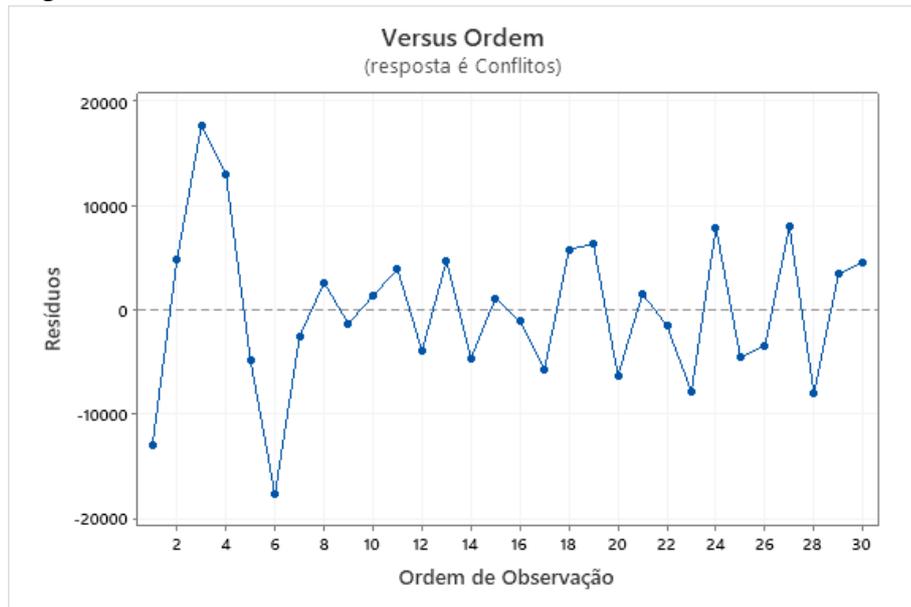
Figura 13 – Gráfico de resíduos versus de ajustes



Fonte: A autora

O gráfico de resíduos versus ordem verifica o pressuposto de que os resíduos são independentes um do outro. Resíduos independentes não mostram tendências nem padrões quando exibidos em ordem temporal. Os padrões nos pontos podem indicar que os resíduos próximos uns dos outros podem ser correlacionados e, portanto, não são independentes. De maneira ideal, os resíduos no gráfico devem cair aleatoriamente em torno da linha central, como ocorre na Figura 14.

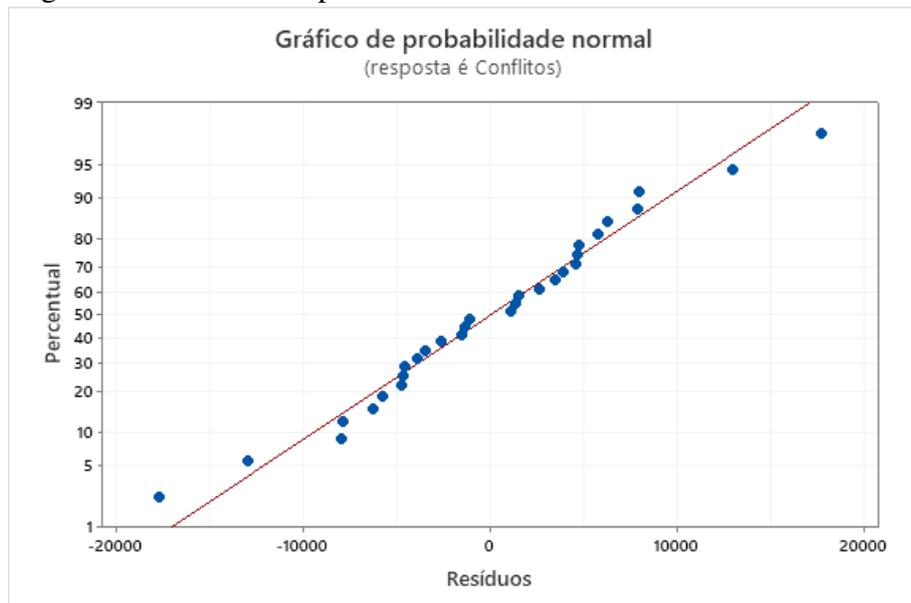
Figura 14 – Gráfico de resíduos versus ordem



Fonte: A autora

O gráfico de probabilidade normal de resíduos verifica a pressuposição de que os resíduos são distribuídos normalmente, e seu formato deve seguir aproximadamente uma linha reta, como ocorre na Figura 15.

Figura 15 – Gráfico de probabilidade normal



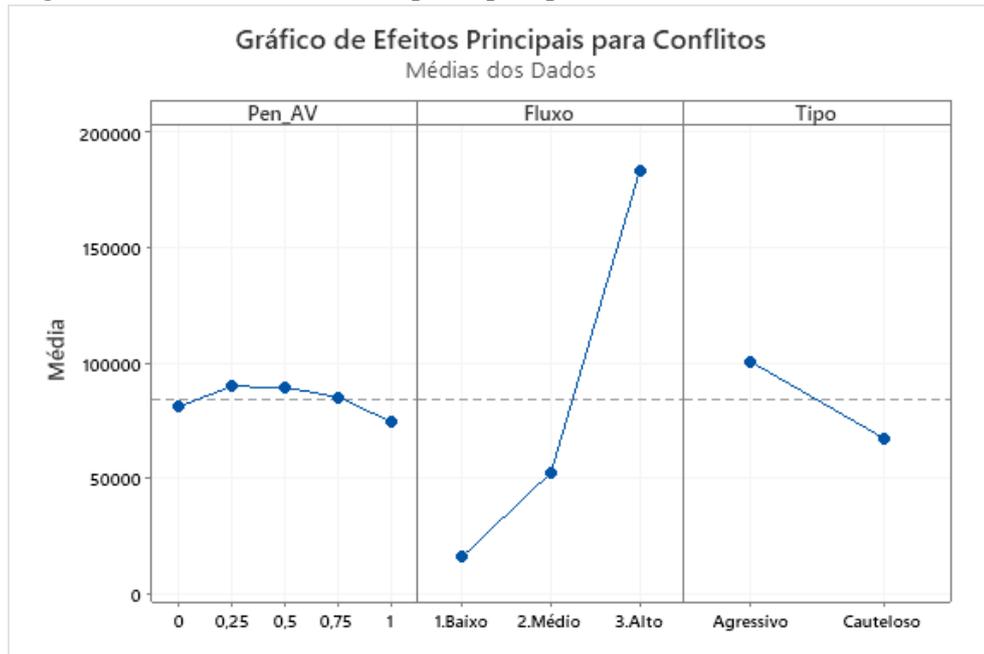
Fonte: A autora

Uma vez que os pressupostos sobre os resíduos serem aleatoriamente distribuídos com variância constante, independentes um do outro e distribuídos normalmente foram atendidos, pode-se dizer que o modelo está adequado.

4.2.2 Análise dos efeitos principais

A análise gráfica da Figura 16, a qual apresenta o impacto dos efeitos principais sobre o número de conflitos, corrobora com a conclusão da análise dos valores-p: apenas as variáveis Fluxo e Tipo produzem variações significativas na média dos conflitos.

Figura 16 – Gráfico de efeitos principais para número de conflitos



Fonte: A autora

É possível destacar a elevada sensibilidade no número de conflitos em relação à demanda veicular. Ao comparar a média de conflitos entre fluxo baixo e alto, houve um aumento 1000%, e entre fluxo baixo e médio, duplicou-se o valor. Esse resultado está de acordo com a afirmativa lógica de que quanto mais veículos estiverem compartilhando infraestrutura, mais conflitos irão ocorrer.

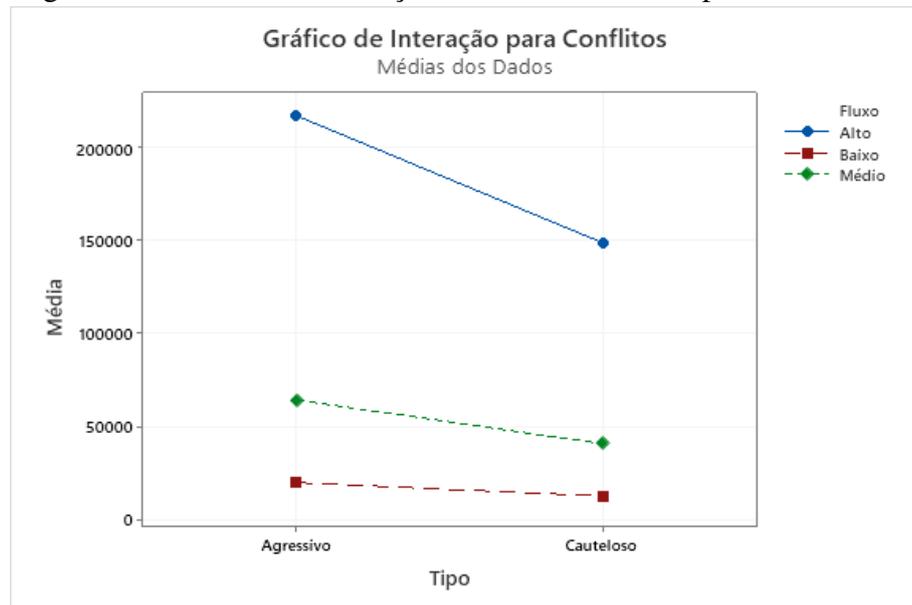
Em relação ao Tipo de AV, nota-se que a média de conflitos gerados em cenários com AVs Agressivos foi aproximadamente 50% maior que a média encontrada em situações com AVs Cautelosos. Tal resultado indica que quanto mais agressivo for o modo de condução do AV, maiores serão os números de conflitos gerados.

Por fim, as médias de conflitos para os diferentes níveis de penetração dos AVs não apresentaram uma variação maior que 21% entre si, e essa baixa sensibilidade, em relação às demais variáveis, é confirmada pelo valor-p de 0,358. Isso indica que o nível de penetração do AV, sozinho, não é capaz de gerar diferenças significativas no número de conflitos.

4.2.3 Análise dos efeitos de interação

Efeitos de interação representam os efeitos conjuntos de dois ou mais fatores controláveis sobre uma variável de resposta (HAIR *et al.*, 2009). Esta seção trata da análise dos efeitos do fluxo veicular combinado ao tipo de AV (Fluxo*Tipo), uma vez que a análise de variância apresentou diferenças significativas dessa interação sobre o número de conflitos. A análise dos efeitos das interações é apresentada na Figura 17.

Figura 17 – Gráfico de interação entre as variáveis Tipo de AV e Fluxo

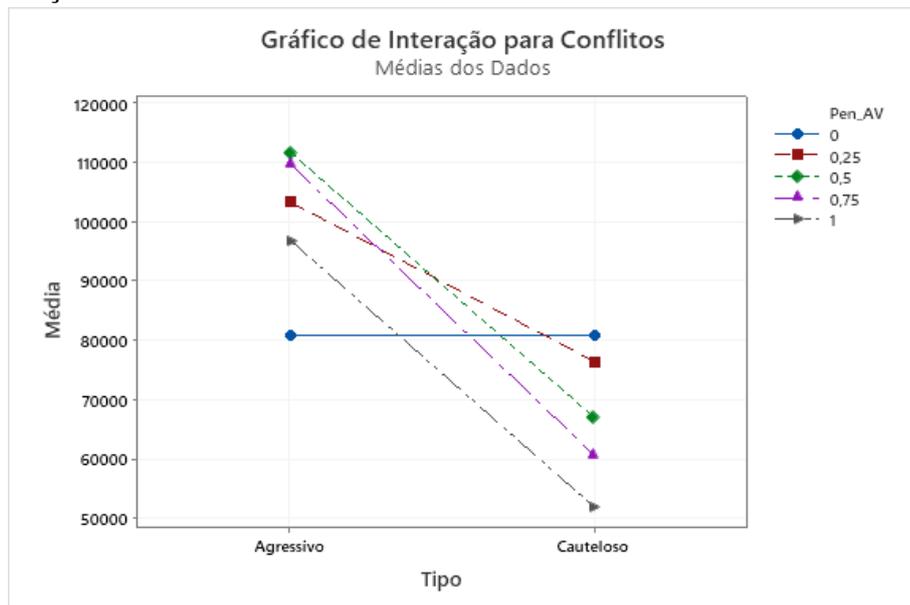


Fonte: A autora

Há uma tendência de redução dos conflitos ao comparar cenários compostos por AVs Agressivos e Cautelosos em diferentes demandas veiculares. À medida que se aumenta o fluxo, aumenta-se o valor das médias dos conflitos por modo de condução, porém houve uma redução do aumento percentual entre AV Cauteloso e Agressivo em fluxo alto em comparação com fluxo baixo e médio. Para demanda veicular baixa, há um aumento percentual do número de conflitos no cenário composto por AVs Agressivos em relação aos cenários de AV Cauteloso de 58%, para demanda média o valor permanece 58% e para demanda alta, cai para 46%.

É relevante observar, ainda, o gráfico de interação entre Penetração de AV e o Tipo de AV (Pen_AV*Tipo), uma vez que essa interação apresentou valor-p próximo ao nível de significância. A análise dos efeitos das interações é apresentada na Figura 18.

Figura 18 – Gráfico de interação entre as variáveis Tipo de AV e Penetração de AV



Fonte: A autora

De maneira geral, observa-se um aumento na média de conflitos ao comparar, com um mesmo nível de penetração de AV, cenários com AV Cautelosos aos cenários com AV Agressivos, o que corrobora com os resultados anteriores os quais indicaram que quanto mais agressivo o modo de condução do AV, mais frequentes serão os conflitos veiculares. O cenário com 0% de AV, como esperado, é uma reta horizontal, uma vez que não há presença de AVs para haver diferenciação no seu modo de condução.

É possível observar na Figura 18 que os AVs Cautelosos diminuem o número médio de conflitos, em relação ao cenário base, à medida que se aumenta a sua penetração. Porém, ao fazer a mesma análise para AVs Agressivos, nota-se que essa lógica não é seguida. Em qualquer nível de penetração, os AVs Agressivos pioram a geração de conflitos em relação ao cenário base para um mesmo fluxo.

Em relação à variação percentual do número de conflitos entre AV Cauteloso e Agressivo, nota-se que à medida que se aumenta a penetração de AV, aumenta-se a variação percentual. Ao comparar o número médio de conflitos com AVs agressivos, em relação aos AVs cautelosos, para uma penetração de 25%, há um aumento de 35%. Quando a penetração sobe para 50%, o aumento percentual sobe para 67%. Em 75% de penetração, a variação é de 81%. Finalmente, para penetração total, há uma variação de 86%.

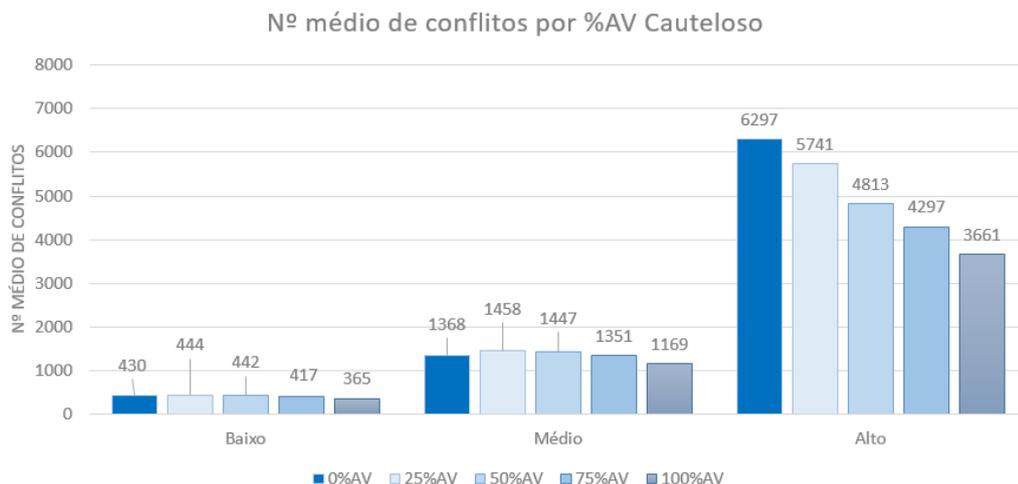
4.3 Incidência dos conflitos

Esta seção irá detalhar a incidência de conflitos verificada em cada um dos 27 cenários simulados. Para melhor visualização dos resultados, o número total de conflitos será apresentado separadamente para cenários simulados com AVs Cautelosos e AVs Agressivos.

4.3.1 Cenários com penetração de AV Cauteloso

A Figura 19 representa um resumo de como o número total de conflitos está se comportando em cenários com a penetração de AVs Cautelosos, e a variação desse número em relação ao cenário base está descrita na Tabela 10.

Figura 19 – Número médio de conflitos simulados com AV Cauteloso



Fonte: A autora

Tabela 10 – Variação do número médio de conflitos com AV Cauteloso

FLUXO	VARIÇÃO DO NÚMERO DE CONFLITOS COM A PRESENÇA DE AV CAUTELOSO				
	0%AV	25%AV	50%AV	75%AV	100%AV
Baixo	0,0%	3,4%	2,8%	-2,9%	-15%
Médio	0,0%	6,6%	5,8%	-1,2%	-15%
Alto	0,0%	-8,8%	-23,6%	-31,8%	-42%

Fonte: A autora

Percebe-se que 33% dos cenários apresentou uma piora no número total de conflitos veiculares em relação ao cenário base com a mesma demanda veicular, sendo esses quatro cenários caracterizados por baixa e média penetração (25% e 50%) e por baixa e média demanda veicular. Apenas a partir de altas penetrações, ou seja, 75% da frota composta por AVs, foi

possível verificar uma redução de conflitos em relação ao cenário base para qualquer nível de demanda veicular. Para altos fluxos, todavia, qualquer nível de penetração de AV Cauteloso provocou uma redução do número de conflitos.

A participação dos AVs no número total de conflitos, para cenários com AV Cautelosos, está representada na Tabela 11. À medida que se aumenta a penetração de AVs, aumenta-se consideravelmente a participação de AVs nos conflitos. Desde baixa penetração, os AVs já são responsáveis por 46% do número total de conflitos.

Tabela 11 – Percentual de conflitos envolvendo AV Cauteloso

%Avs em conflito - nº total			
FLUXO	PENETRAÇÃO DE AV		
	25%	50%	75%
BAIXO	46%	74%	91%
MÉDIO	49%	76%	92%
ALTO	49%	78%	93%
Cauteloso			

Fonte: A autora

Ao verificar a porcentagem de conflitos apenas entre dois veículos autônomos (AV-AV), na Tabela 12, é possível identificar que a maioria dos conflitos em cenários cautelosos ocorre entre veículos convencionais e veículos autônomos.

Tabela 12 – Percentual de conflitos AV-AV para cenários cautelosos

Conflitos AV-AV			
FLUXO	PENETRAÇÃO DE AV		
	25%	50%	75%
BAIXO	6%	7%	8%
MÉDIO	20%	24%	27%
ALTO	42%	50%	54%
Cauteloso			

Fonte: A autora

De maneira geral, para 67% dos cenários simulados com veículos autônomos classificados como cautelosos houve uma redução do número total de conflitos ao se comparar com o cenário base, ou seja, sem AVs. Isso pode ser explicado devido aos dispositivos que estão inseridos nesse tipo de AV, como o *enforce absolute braking distance*, o qual possibilita que o veículo sempre se certifique de que pode frear sem que ocorra uma colisão. Além disso, essa redução pode estar atrelada ao comportamento de *car following* do AV cauteloso, o qual foca mais na segurança da condução que na assertividade, como ao adotar um tempo de headway (CC1) maior

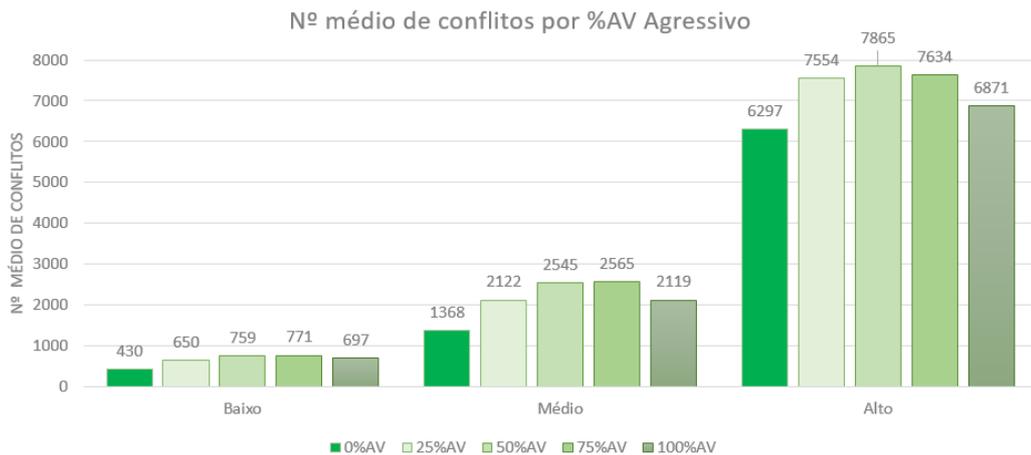
que o valor *default* para veículos convencionais, possibilitando maiores espaçamentos entre os veículos, ou ao assumir uma aceleração desejada (CC8) menor que a *default* para possibilitar que o veículo saia mais confortavelmente do repouso.

Os demais cenários apresentaram um aumento do número de conflitos com a inserção de AVs Cautelosos, sendo caracterizados por baixo e médio fluxo veicular e penetrações de 25% e 50%. O estudo de Kockelman *et al.* (2016) também apresenta um aumento de conflitos de 80% e 40%, em relação ao cenário base, para fluxo baixo à penetrações de AV de 25% e 50% respectivamente. Embora não seja assertivo comparar os resultados, uma vez que as premissas da caracterização do veículo autônomo são distintas entre os estudos, essa tendência de aumento de conflitos para fluxo baixo com penetração de AVs baixa e média pode indicar que a calibração do comportamento desses veículos ao interagir com veículos convencionais não esteja adequada, uma vez que a maioria dos conflitos ocorre entre veículo convencional e veículo autônomo.

4.3.2 Cenários com penetração de AV Agressivo

A Figura 20 representa um resumo de como o número total de conflitos está se comportando em cenários com a penetração de AVs Agressivos, e a variação desse número em relação ao cenário base está descrita na Tabela 13.

Figura 20 – Número médio de conflitos simulados com AV Agressivo



Fonte: A autora

Tabela 13 – Variação do número médio de conflitos com AV Agressivo

FLUXO	VARIACÃO DO NÚMERO DE CONFLITOS COM A PRESENÇA DE AV AGRESSIVO				
	0%AV	25%AV	50%AV	75%AV	100%AV
Baixo	0,0%	51,4%	76,7%	79,3%	62%
Médio	0,0%	55,2%	86,0%	87,6%	55%
Alto	0,0%	20,0%	24,9%	21,2%	9%

Fonte: A autora

Percebe-se que todos dos cenários apresentaram uma piora no número total de conflitos veiculares em relação ao cenário base com a mesma demanda veicular. Esse resultado está indicando o oposto obtido por trabalhos anteriores (KAPPLER, 2020; PAPADOULIS *et al.*, 2019), os quais apontam uma redução dos conflitos em qualquer cenário de penetração de AVs.

A participação dos AVs no número total de conflitos, para cenários com AV Agressivos, está representada na Tabela 14. À medida que se aumenta a penetração de AVs, aumenta-se a participação de AVs nos conflitos. Desde baixa penetração, os AVs já são responsáveis por 63% do número total de conflitos.

Tabela 14 – Percentual de conflitos envolvendo AV Agressivo

%Avs em conflito - nº total			
FLUXO	PENETRAÇÃO DE AV		
	25%	50%	75%
BAIXO	63%	85%	95%
MÉDIO	65%	86%	96%
ALTO	66%	87%	96%
Agressivo			

Fonte: A autora

Ao verificar a porcentagem de conflitos apenas entre dois veículos autônomos (AV-AV), na Tabela 15, é possível identificar que a maioria dos conflitos em cenários agressivos, assim como foi verificado para os cenários cautelosos, ocorre entre veículos convencionais e veículos autônomos.

Tabela 15 – Percentual de conflitos AV-AV para cenários agressivos

Conflitos AV-AV			
FLUXO	PENETRAÇÃO DE AV		
	25%	50%	75%
BAIXO	9%	10%	12%
MÉDIO	24%	29%	32%
ALTO	46%	51%	56%
Agressivo			

Fonte: A autora

De maneira geral, todos os cenários simulados com veículos autônomos classificados como agressivos tiveram um aumento do número total de conflitos ao se comparar com o cenário base, ou seja, sem AVs. Esses resultados se opõem aos encontrados por Kappler (2020), os quais demonstram uma redução do número de conflitos para todos os cenários simulados. Diante disso, pode-se supor que o modo de representação adotado para AV Agressivo no microsimulador VISSIM, em ambiente urbano, não está sendo adequado. Os parâmetros para AVs agressivos refletem comportamentos mais assertivos, como adotar menor distância mínima em repouso (CC0) e menor distância de segurança (menor *headway* CC1 e menor variação de *following* CC2), além de possuir uma aceleração desejada (CC8) superior ao valor *default* para veículos convencionais. Assim, menores *headways* são esperados para AVs Agressivos. Como a maioria dos conflitos está ocorrendo entre veículos convencionais e autônomos, essa interação entre os veículos ganha destaque entre as possíveis fontes de problema de representação comportamental. É necessário que o AV ao identificar que está seguindo um veículo convencional assumo comportamento mais cauteloso do que se estivesse seguindo um outro AV.

4.4 Severidade dos conflitos

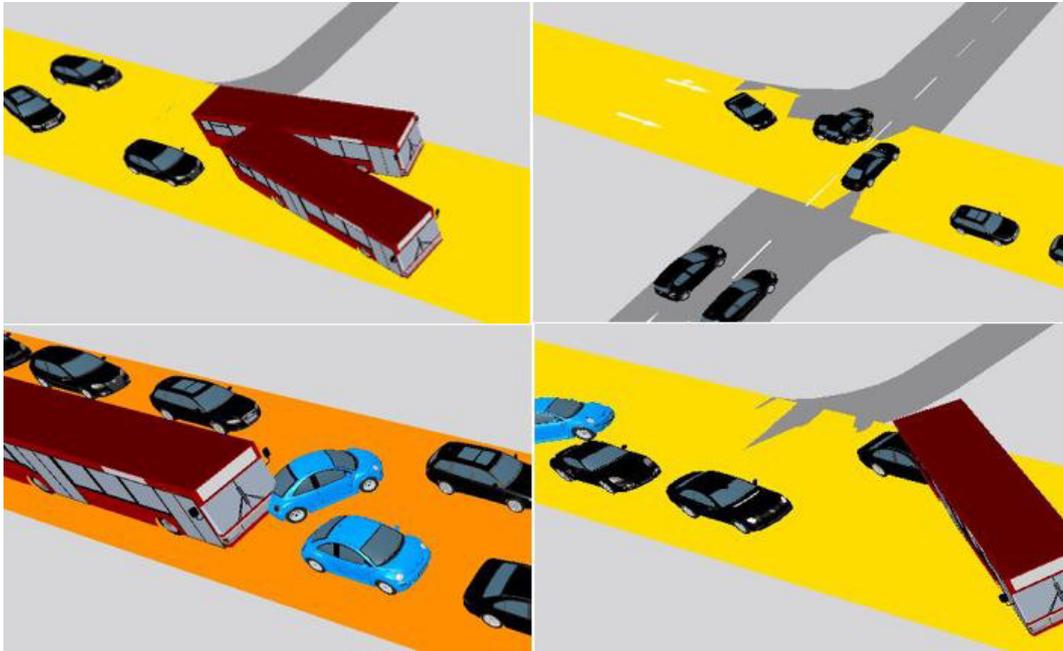
Esta seção irá comparar os cenários simulados a partir da diferença entre o nível de severidade dos conflitos identificados. Foi definido que a severidade dos conflitos seria avaliada por dois indicadores *proxy* de segurança, TTC e MaxS, os quais referem-se, respectivamente, ao conflito em si e à possível severidade de um sinistro decorrente do conflito. Kockelman *et al.* (2016) afirmam que para a representação de AVs a partir de modelos de direção do VISSIM, TTC e PET não fornecem uma boa indicação da probabilidade de uma colisão. Isso é justificado devido aos veículos autônomos já seguirem bastante próximos uns dos outros, produzindo valores menores de TTC e PET, que aumentam o número de conflitos reconhecidos pelo SSAM. Mesmo com essa ressalva, diversos estudos (KAPPLER, 2020; PAPADOULIS *et al.*, 2019; RAHMAN

et al., 2018) utilizaram o TTC para avaliar o desempenho de segurança viária com inserção de AVs. Dessa forma, este estudo optou por também analisar o TTC, mas em conjunto com um segundo indicador que aprofundasse a investigação de severidade, no caso a máxima velocidade encontrada durante o conflito, MaxS, fornecida em metros por segundo.

4.4.1 Filtro de TTC

É relevante destacar que após a análise das trajetórias no SSAM, aplicou-se um filtro para os conflitos, o qual passou a considerar conflito os eventos com TTC a partir de 0,5s até o limite máximo estabelecido de 3,6s. A motivação dessa filtragem é devido aos problemas encontrados no microssimulador em representar os conflitos com TTCs mais baixos. Foram frequentemente observados veículos ocupando o mesmo espaço na simulação, um ignorando a presença do outro para realizar o seu movimento, o que seria identificado como um conflito com TTC igual a zero, mas que não corresponde a uma situação verossímil. A Figura 21 traz exemplos de situações com TTC igual a zero encontradas durante as simulações.

Figura 21 – Conflitos veiculares com TTC igual a zero



Fonte: A autora

Ao observar as Tabelas 16 e 17, as quais apresentam a redução do número de conflitos após a aplicação do filtro de TTC, percebe-se que tanto para simulações com AVs cautelosos quanto para simulações com AVs agressivos há uma presença considerável de conflitos com TTC abaixo de 0,5s. A remoção desses conflitos reduziu até 42% do número total para AVs

cautelosos, e até 48% para AVs agressivos.

Tabela 16 – Redução do número de conflitos totais após filtragem de TTC para AV Cauteloso

REDUÇÃO DE CONFLITOS COM FILTRO				
FLUXO	PENETRAÇÃO DE AV			
	25%	50%	75%	100%
BAIXO	-38%	-39%	-40%	-42%
MÉDIO	-33%	-35%	-37%	-39%
ALTO	-35%	-34%	-36%	-39%
Cauteloso				

Fonte: A autora

Tabela 17 – Redução do número de conflitos totais após filtragem de TTC para AV Agressivo

REDUÇÃO DE CONFLITOS COM FILTRO				
FLUXO	PENETRAÇÃO DE AV			
	25%	50%	75%	100%
BAIXO	-41%	-43%	-46%	-47%
MÉDIO	-40%	-42%	-45%	-48%
ALTO	-44%	-43%	-45%	-46%
Agressivo				

Fonte: A autora

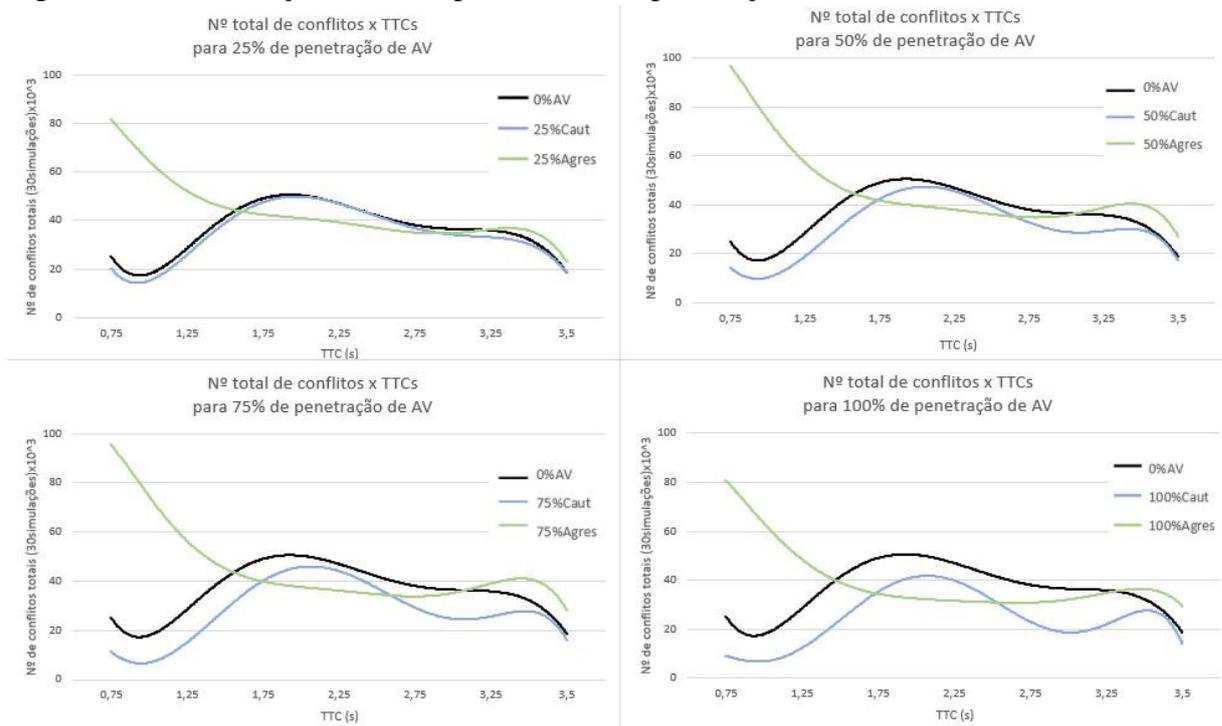
4.4.2 Distribuição de TTCs

Para investigar como os TTCs estão distribuídos nas simulações executadas, a Figura 22 apresenta um resumo dos TTCs para cada cenário de penetração de AVs, comparando em cada caso o cenário base aos cenários cauteloso e agressivo.

No cenário agressivo, para qualquer nível de penetração, é perceptível uma maior frequência de TTCs menores que 1s em comparação aos cenários cauteloso e base. Isso indica uma tendência de os AVs Agressivos estarem envolvidos em um número maior de colisões, uma vez que quanto menor o tempo para colisão de um conflito, maior a chance deste culminar em uma colisão. As inclinações do gráfico agressivo se mantêm constantes entre os diferentes níveis de penetração de AV, havendo apenas um deslocamento vertical do gráfico para penetração total, o que é justificado pelo considerável menor número total de conflitos nesse cenário em relação aos demais.

As inclinações do gráfico do cenário cauteloso são semelhantes às do gráfico base, sendo deslocado verticalmente abaixo por reduzir homogeneamente o número de conflitos no intervalo de TTC estabelecido. Para os dois, é possível notar uma concentração de TTCs entre

Figura 22 – Distribuição de TTCs para diferentes penetrações de AV



Fonte: A autora

1,75s e 2,25s.

4.4.3 Comparação de MaxS

O TTC ajuda a compreender quão próximo um conflito esteve de ser uma colisão: quanto menor o seu valor, mais chance aquele evento tem de ser um sinistro. Mas o mesmo nada afirma em relação à severidade que o possível sinistro poderia ter, uma vez que pode assumir o mesmo valor em situações completamente distintas. Pode-se obter o mesmo TTC em uma situação entre veículos com altas velocidades e com um maior distanciamento entre si e veículos com baixas velocidades mas muito próximos. Colisões mais severas estão atreladas a velocidades maiores, pois geram mais danos pelo maior impacto entre corpos. Dessa forma, o MaxS, definido pela velocidade máxima em conflito, em metros por segundo, pode ajudar a compreender a seriedade desses possíveis incidentes.

Verificou-se que a distribuição de TTCs para os AVs cautelosos assemelha-se à distribuição do cenário base, ou seja, terão possivelmente uma geração de sinistros viários de forma semelhante. Mas a severidade desses sinistros pode ser distinta, para isso serão avaliadas as velocidades máximas em conflito.

Para investigar o comportamento desse indicador, foram escolhidos 10 cenários

dos 27 simulados. Essa escolha foi baseada em situações que representassem os extremos de cada variável, ou seja, alta e baixa demanda veicular, e alta e baixa penetração de AV. Dessa forma, foram criados quatro grupos de análises, utilizando a combinação desses quatro níveis de variáveis, os quais são subdivididos em relação ao tipo de AV. Cada um dos quatro grupos contém uma comparação entre cenário base e cauteloso, base e agressivo, e entre cauteloso e agressivo. O objetivo é visualizar qual o impacto individual de cada modo de condução na severidade dos possíveis sinistros (indicada pelo MaxS). Para haver melhoria na segurança viária, o ideal é que o cenário seja capaz de reduzir a velocidade máxima em conflito (diminuindo o MaxS).

A Tabela 18 representa um resumo da análise estatística entre cenários com baixa demanda veicular e com baixa penetração de AV. Com um nível de significância de 0,05, foi verificado que as médias de MaxS entre todos as combinações de cenários foi estatisticamente significativa. A presença de AVs na composição de tráfego com baixa demanda é responsável por diminuir a velocidade máxima de qualquer um dos veículos envolvidos no conflito, ou seja, o MaxS. Entre os tipos de AV, quanto maior a agressividade menor a média do MaxS, o que implica em possíveis acidentes menos severos. Há uma melhoria na segurança viária com a inserção de AVs cautelosos e agressivos para baixo fluxo e baixa penetração.

Tabela 18 – Comparativo de MaxS entre cenários de baixa demanda e baixa penetração

Baixa demanda & Baixa Penetração							
Indicador	Cenário Base		Cenário Cauteloso		valor-p ($\alpha=0,05$)	Significativo	Variação
	Média	Variância	Média	Variância			
MaxS (km/h)	11,65	11,49	10,98	14,02	0,00	SIM	-6%
Indicador	Cenário Base		Cenário Agressivo		valor-p ($\alpha=0,05$)	Significativo	Variação
	Média	Variância	Média	Variância			
MaxS (km/h)	11,65	11,49	9,48	20,21	0,00	SIM	-19%
Indicador	Cenário Cauteloso		Cenário Agressivo		valor-p ($\alpha=0,05$)	Significativo	Variação
	Média	Variância	Média	Variância			
MaxS (km/h)	10,98	14,02	9,48	20,21	0,00	SIM	-14%

Fonte: A autora

A Tabela 19 representa um resumo da análise estatística entre cenários com baixa demanda veicular e com alta penetração de AV. Com um nível de significância de 0,05, foi verificado que as médias de MaxS entre todos as combinações de cenários foi estatisticamente significativa. A elevada presença de AVs na composição de tráfego com baixa demanda é responsável por diminuir o MaxS. Entre os tipos de AV, quanto maior a agressividade menor a média do MaxS, o que implica em possíveis acidentes menos severos. Há uma melhoria

na segurança viária com a inserção de AVs cautelosos e agressivos para baixo fluxo e alta penetração.

Tabela 19 – Comparativo de MaxS entre cenários de baixa demanda e alta penetração

Baixa demanda & Alta Penetração							
Indicador	Cenário Base		Cenário Cauteloso		valor-p ($\alpha=0,05$)	Significativo	Variação
	Média	Variância	Média	Variância			
MaxS (km/h)	11,65	11,49	9,65	15,21	0,00	SIM	-17%
Indicador	Cenário Base		Cenário Agressivo		valor-p ($\alpha=0,05$)	Significativo	Variação
	Média	Variância	Média	Variância			
MaxS (km/h)	11,65	11,49	8,48	19,69	0,00	SIM	-27%
Indicador	Cenário Cauteloso		Cenário Agressivo		valor-p ($\alpha=0,05$)	Significativo	Variação
	Média	Variância	Média	Variância			
MaxS (km/h)	9,65	15,21	8,48	19,69	0,00	SIM	-12%

Fonte: A autora

A Tabela 20 representa um resumo da análise estatística entre cenários com alta demanda veicular e com baixa penetração de AV. Com um nível de significância de 0,05, foi verificado que as médias de MaxS entre todos as combinações de cenários foi estatisticamente significativa. A média de MaxS para baixa presença de AVs na composição de tráfego com alta demanda são dependentes do Tipo de AV. Caso sejam cautelosos, há um aumento da velocidade implicando em maior severidade de um possível acidente, em relação ao cenário base. Caso sejam agressivos, há uma redução de MaxS, implicando em menor severidade de um possível acidente.

Tabela 20 – Comparativo de MaxS entre cenários de alta demanda e baixa penetração

Alta demanda & Baixa Penetração							
Indicador	Cenário Base		Cenário Cauteloso		valor-p ($\alpha=0,05$)	Significativo	Variação
	Média	Variância	Média	Variância			
MaxS (km/h)	9,79	13,16	10,67	14,78	0,00	SIM	9%
Indicador	Cenário Base		Cenário Agressivo		valor-p ($\alpha=0,05$)	Significativo	Variação
	Média	Variância	Média	Variância			
MaxS (km/h)	9,79	13,16	9,12	19,88	0,00	SIM	-7%
Indicador	Cenário Cauteloso		Cenário Agressivo		valor-p ($\alpha=0,05$)	Significativo	Variação
	Média	Variância	Média	Variância			
MaxS (km/h)	10,67	14,78	9,12	19,88	0,00	SIM	-15%

Fonte: A autora

A Tabela 21 representa um resumo da análise estatística entre cenários com alta demanda veicular e com alta penetração de AV. Com um nível de significância de 0,05, foi verificado que as médias de MaxS entre todos as combinações de cenários foi estatisticamente

significativa. A média de MaxS para alta presença de AVs na composição de tráfego com alta demanda são dependentes do Tipo de AV. Caso sejam cautelosos, há um aumento da velocidade implicando em maior severidade de um possível acidente, em relação ao cenário base. Caso sejam agressivos, há uma redução de MaxS, implicando em menor severidade de um possível acidente.

Tabela 21 – Comparativo de MaxS entre cenários de alta demanda e alta penetração

Alta demanda & Alta Penetração							
Indicador	Cenário Base		Cenário Cauteloso		valor-p ($\alpha=0,05$)	Significativo	Variação
	Média	Variância	Média	Variância			
MaxS (km/h)	9,79	13,16	9,87	16,78	0,00	SIM	1%
Indicador	Cenário Base		Cenário Agressivo		valor-p ($\alpha=0,05$)	Significativo	Variação
	Média	Variância	Média	Variância			
MaxS (km/h)	9,79	13,16	8,67	18,55	0,00	SIM	-11%
Indicador	Cenário Cauteloso		Cenário Agressivo		valor-p ($\alpha=0,05$)	Significativo	Variação
	Média	Variância	Média	Variância			
MaxS (km/h)	9,87	16,78	8,67	18,55	0,00	SIM	-12%

Fonte: A autora

A Tabela 22 apresenta um resumo das alterações na média de MaxS discutidas, sempre em relação ao cenário base.

Tabela 22 – Resumo das alterações na média de MaxS em comparação ao cenário base

MaxS				
Demanda	%AV Cauteloso		%AV Agressivo	
	Baixa	Alta	Baixa	Alta
Baixa	-6%	-17%	-19%	-27%
Alta	9%	1%	-7%	-11%

Fonte: A autora

Para situações com baixa demanda, o valor da velocidade máxima em conflito diminui com a presença de AV, indicando potenciais sinistros menos severos. Para situações com alta demanda, o valor do MaxS depende do tipo de AV adotado. Para cautelosos a velocidade aumenta, indicando maior severidade, e para agressivos a velocidade continua a diminuir.

Embora exista significância estatística no aumento da velocidade máxima em conflito para AVs cautelosos em alta demanda, é importante destacar que, na prática, o aumento de 9km/h para 10km/h não acometerá em conflitos expressivamente mais severos.

4.5 Classificação dos conflitos

Esta seção irá detalhar como estão ocorrendo os conflitos verificados em cada um dos 27 cenários simulados. Para melhor visualização dos resultados, eles serão apresentados separadamente para cenários simulados com AVs Cautelosos e AVs Agressivos. Entende-se por *crossing* os conflitos de cruzamento, *rear end* os conflitos longitudinais e *lane change* os conflitos de mudança de faixa.

Em cenários com AVs cautelosos, como indicado na Tabela 23, há uma predominância de conflitos do tipo longitudinal, seguido pelo de mudança de faixa. À medida que se aumenta a penetração de AVs nas vias, os conflitos de cruzamento e de mudança de faixa, os quais eram minoria, reduzem ainda mais sua participação no número total de conflitos. Essa tendência é um bom indicativo para a segurança viária em geral, pois mostra que o conflito de cruzamento, considerado o mais severo em relação aos danos globais, não está sendo incentivado com a presença de AVs cautelosos nas vias.

Tabela 23 – Distribuição dos tipos de conflitos para cenários com AV Cauteloso

Cauteloso			
	crossing	rear end	lane change
0%	2,14%	77,41%	20,45%
25%	1,57%	77,77%	20,66%
50%	1,16%	77,25%	21,58%
75%	0,70%	78,59%	20,71%
100%	0,26%	80,25%	19,49%

Fonte: A autora

Assim como ocorre para os cautelosos, em cenários com AVs agressivos, como indicado na Tabela 24, há uma predominância de conflitos do tipo longitudinal, seguido pelo de mudança de faixa. À medida que se aumenta a penetração de AVs nas vias, os conflitos de cruzamento e de mudança de faixa, os quais eram minoria, reduzem ainda mais sua participação no número total de conflitos. Como ocorreu com os cautelosos, essa tendência é um bom indicativo para a segurança viária em geral, pois mostra que o conflito de cruzamento não está sendo incentivado com a presença de AVs cautelosos nas vias.

Tabela 24 – Distribuição dos tipos de conflitos para cenários com AV Agressivo

Agressivo			
	crossing	rear end	lane change
0%	2,14%	77,41%	20,45%
25%	1,17%	81,38%	17,45%
50%	0,74%	82,49%	16,77%
75%	0,45%	82,92%	16,63%
100%	0,16%	84,31%	15,53%

Fonte: A autora

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo geral avaliar o impacto da inserção de veículos autônomos em via arterial no desempenho da segurança viária utilizando conflitos veiculares simulados no microssimulador VISSIM. Para atingi-lo, foram traçados quatro objetivos específicos que incluíam identificar características de operação de AVs e analisar a adequabilidade do microssimulador VISSIM para representá-las, avaliar a frequência e a severidade de conflitos veiculares entre AVs e veículos convencionais e verificar como diferentes taxas de penetração de AV e como a demanda veicular afetam as interações entre AVs e veículos convencionais.

O Capítulo 2 abordou as diferentes classificações existentes para veículos autônomos, apresentando seus componentes físicos e lógicas de condução. Ao detalhar o processo de representação dos AVs no VISSIM, ficou evidente a ainda restrita capacidade do microssimulador em representar a automação com base em recursos internos ao software, ficando a representação mais detalhada bastante dependente de plataformas externas ao VISSIM, que exigem domínio de linguagem de programação do usuário para modelagem comportamental do AV.

Os dois tipos de AV simulados, cauteloso e agressivo, produziram resultados distintos em relação à geração de conflitos. Enquanto o AV cauteloso é capaz de diminuir até 42% o número de conflitos em relação ao cenário base, o AV agressivo aumenta até 87,6% esse número. 67% dos cenários simulados com AV cautelosos tiveram redução do número de conflitos ao ser comparado ao cenário base. Apenas em baixa e média demanda veicular e baixa e média penetração de AV houve um aumento, sendo o pior cenário responsável por um incremento de 6,6%. Para os AVs agressivos, todos os cenários tiveram um aumento do número de conflitos. Esse aumento pode ser derivado da própria definição de conflito estabelecida por esse estudo, a qual considera o tempo de colisão máximo de 3,6s. Esse valor, calibrado para tráfego rodoviário contendo apenas veículos convencionais, pode ser considerado muito alto para conflitos com AVs, especialmente os agressivos, devido ao comportamento de *following* dos AVs adotar menores *headways*. Justamente por essa característica, Rahman *et al.* (2018) propuseram um TTC diferenciado para conflitos do tipo AV-AV, representando um valor menor em relação aos demais tipos de conflitos, seja entre veículos convencionais seja entre convencional e autônomo.

A maioria dos conflitos identificados envolve AV como veículo de resposta, seja cauteloso ou agressivo, em qualquer composição de tráfego, então pode-se afirmar que boa parte desses conflitos não seriam potencialmente perigosos, uma vez que o AV possui um comportamento padronizado de poder ativar freios automáticos em caso de perigo de acidente.

Dessa forma, como indicam Papadoulis *et al.* (2019), Morando *et al.* (2018), Rahman *et al.* (2018), os valores de TTC para os AVs podem ser menores do que os observados para os veículos convencionais, mas devido aos seus recursos de desaceleração automática, de avisos de potenciais conflitos antecipadamente e de manobras evasivas automáticas, não implicam necessariamente em maior severidade dos conflitos.

Em relação à máxima velocidade dos veículos em conflito, indicada pelo MaxS, observa-se que, de maneira geral, os veículos autônomos estão diminuindo a média das velocidades, o que é um indicador de melhoria para a segurança das vias, uma vez quanto menor a velocidade dos veículos envolvidos em um sinistro, menores serão os danos associados.

Quanto à influência de variáveis controláveis sobre o número de conflitos, foi possível observar que o tipo de condução do veículo autônomo, cauteloso ou agressivo, o nível de demanda do tráfego, baixa, média e alta, e a combinação deles produziram mudanças significativas na média de conflitos observados entre os diferentes cenários. Percebe-se que AVs agressivos são os que pioram mais o nível de segurança do tráfego com base na geração de conflitos, e esse resultado é provocado pelas características mais agressivas de parâmetros como o CC1 e CC8, os quais implicam em menores *headways* e em maiores acelerações desejadas. Em relação à demanda veicular, notou-se que quanto mais veículos estivessem nas vias, maiores seriam os números de conflitos identificados, e piorava à medida que se acrescentavam AVs agressivos. O único resultado positivo para a melhoria da segurança do tráfego ocorreu no cenário com alto nível de demanda, para AVs cautelosos, em que à medida que se acrescentavam AVs ao tráfego, diminuíam os conflitos.

Uma limitação deste estudo consistiu na representação dos AVs no VISSIM, pois uma vez que os dados de AV do mundo real não são amplamente acessíveis, o comportamento dos AVs em uma rede ainda é desconhecido e a validação do comportamento de AV simulado não é possível. Este estudo é baseado na definição de AV sugerida pelo CoExist, a qual calibrou o comportamento dos AVs em situações de tráfego europeu, as quais são consideravelmente distintas da encontrada no Brasil, onde foi realizado este estudo.

De acordo com os resultados encontrados é possível identificar sugestões para trabalhos futuros que objetivem aprofundar o estudo aqui realizado, fomentando a discussão a respeito dos veículos autônomos e seu impacto na segurança viária. A principal indicação é a de aprimorar a representação do AV no microssimulador, a partir do desenvolvimento de uma lógica de programação que represente tanto a automação quanto a conectividade em veículos, e que seja

capaz de simular a maior quantidade de ADAS possível. Além disso, pode ser integrada à análise de segurança um maior número de indicadores *proxy*, aumentando a capacidade explicativa do estudo. Por fim, também é relevante a investigação das influências da geometria das vias na geração de conflitos.

REFERÊNCIAS

- ATKINS. **Research on the impacts of connected and autonomous vehicles (CAVs) on traffic flow.** . Summary Report Department for Transport Atkins, 2016.
- BAGLOEE, S. A.; TAVANA, M.; ASADI, M.; OLIVER, T. Autonomous vehicles: challenges, opportunities, and future implications for transportation policies. **Journal of Modern Transportation**, v. 24, n. 4, p. 284–303, 2016.
- BERG, V. A. C. V. D.; VERHOEF, E. T. Autonomous cars and dynamic bottleneck congestion: The effects on capacity , value of time and preference heterogeneity. **Transportation Research Part B**, Elsevier Ltd, p. 43–60, 2016.
- CALEFFI, F.; ANZANELLO, M. J.; CYBIS, H. B. B. A multivariate-based conflict prediction model for a brazilian freeway. **Accident Analysis Prevention**, v. 98, p. 295–302, 2017.
- COPPOLA, P.; SILVESTRI, F. **Autonomous vehicles and future mobility solutions.** [S. l.]: Elsevier, 2019.
- CUNTO, F. J. C.; LOUREIRO, C. F. G. O uso da microssimulação na avaliação do desempenho da segurança viária. **Transportes**, v. 19, n. 3, p. 5–11, 2011.
- DAHL, A.; FLÉCHON, C.; SUKENNIK, P.; WALTHER, C. Microscopic simulation and impact assessment of the coexistence of automated and conventional vehicles in european cities. **European Transport Conference**, p. 1–13, 2018.
- FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. **Surrogate Safety Assessment Model (SSAM):** Software user manual. [S. l.], 2008.
- GOPAL, M.; SINGH, N. K.; G.S.S.V.CHAITANYA; LAKSHMI, N. Distracted driver detection. **Journal Science, Technology and Development**, IX, n. I, p. 477–488, 2020.
- HAIR, J. F.; BLACK, W. C.; BABIN, B. J.; ANDERSON, R. E. **Multivariate Data Analysis.** Pearson Prentice Hall, Ed. (Seventh Ed.), 2009.
- HYDÉN, C. **The development of a method for traffic safety evaluation: The Swedish traffic conflicts technique.** Bulletin 70. Department of Traffic Planning and Engineering, Lund University, Lund, Sweden., 1987.
- IHS, A. “Autonomous vehicle sales forecast to reach 21 mil. globally in 2035, according to IHS Automotive.”. 2016. Disponível em: <https://ihsmarkit.com/country-industry-forecasting.html?ID=10659115737>. Acesso em: 25 ago. 2020.
- KALRA, N.; PADDOCK, S. M. **Driving to Safety: How Many Miles of Driving Would It Take to Demonstrate Autonomous Vehicle Reliability?** Rand Corporation., 2016.
- KAPPLER, L. B. **Análise dos impactos de veículos autônomos em uma rodovia brasileira com simulação de tráfego.** 2020. 77 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Escola De Engenharia, Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul, Porto Alegre, 2020.
- KOCKELMAN, K.; AVERY, P.; BANSAL, P.; BOYLES, S. D.; BUJANOVIC, P.; CHOUDHARY, T.; CLEMENTS, L.; DOMNENKO, G.; FAGNANT, D.; HELSEL, J.; HUTCHINSON, R.; LEVIN, M.; LI, J.; LI, T.; OTWAY, L. L.; NICHOLS, A.; SIMONI,

- M.; STEWART, D. **Implications of Connected and Automated Vehicles on the Safety and Operations of Roadway Networks: A Final Report.** FHWA/TX-16/0-6849-1, 2016.
- LACERDA, V. M. **Estimação da velocidade média em vias urbanas com uso do microssimulador Vissim.** 2016. 152 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.
- MILAKIS, D.; SNELDER, M.; AREM, B. van; B. van W.; CORREIA, G. H. de A. **Scenarios about development and implications of automated vehicles in the Netherlands.** 95th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington DC, 2016.
- MONTGOMERY, D. **Design and Analysis of Experiments.** 3a Ed. New York: John Wiley and Sons, 1991.
- MORANDO, M. M.; TIAN, Q.; TRUONG, L. T.; VU, H. L. Studying the safety impact of autonomous vehicles using simulation-based surrogate safety measures. **Journal of Advanced Transportation**, v. 2018, 2018.
- NATIONAL TRAFFIC LAW CENTER. **Investigation and prosecution of distracted driving cases:** National highway traffic safety administration. Washington, DC, 2017.
- NOYES, P. **Module 1: Introduction to ITS.** 2020. Disponível em: <https://www.pcb.its.dot.gov/eprimer/module1.aspx>. Acesso em: 13 jun. 2020.
- PAPADOULIS, A.; QUDDUS, M.; IMPRIALOU, M. Evaluating the safety impact of connected and autonomous vehicles on motorways. **Accident Analysis Prevention**, v. 124, p. 12–22, 2019.
- PERKINS, S.; HARRIS, J. **Criteria for traffic conflict characteristics.** Report GMR 632. Technical Report, General Motors Cooperation., 1968.
- PIJPERS, M. **Sensors in ADAS.** 2007.
- POLIS. **Road Vehicle Automation and Cities and Regions Mobility Traffic Efficiency.** European Cities and Regions Networking for Innovative Transport Solutions, 2018.
- PTV. **VISSIM 2020. User Manual.** Karlsruhe, Germany, 2020.
- QULSAR. **“Sensor Fusion in Autonomous Vehicles.”.** 2020. Disponível em: https://qulsar.com/Applications/Vehicular_Sync/Autonomous_vehicles.html. Acesso em: 20 set. 2020.
- RAHMAN, M. S.; ABDEL-ATY, M.; LEE, J.; RAHMAN, M. H. **Safety benefits of arterials’ crash risk under connected and automated vehicles.** **Transportation Research Part C**, xxxx, v. 100, p. 354–371, 2019.
- RAHMAN, M. S.; ABDEL-ATY, M.; WANG, L.; LEE, J. **Understanding the highway safety benefits of different approaches of connected vehicles in reduced visibility conditions.** **Transportation Research Record**, xxxx, v. 2672, n. 19, p. 91–101, 2018.
- SAE INTERNATIONAL. **SAE J3016:** Levels of driving automation. [S. l.], 2014.
- SANTOS, P. D.; JUNIOR, J. C.; VISMARI, L. **Uma proposta de análise do impacto dos veículos autônomos sobre aspectos logísticos do sistema viário atual.** 32º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET, 2018.

SINGH, S. **Critical reasons for crashes investigated in the national motor vehicle crash causation survey.** 13th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Washington DC, 2015.

SOUSA, J. Q. **Modelagem microscópica aplicada na avaliação do desempenho da segurança viária em interseções urbanas.** 2012. 129 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Departamento de Engenharia de Transportes, Universidade Federal Do Ceará, Fortaleza, 2012.

STANEK, D.; HUANG, E.; MILAN, R. T.; WANG, T. A. **Measuring Autonomous Vehicle Impacts on Congested Networks Using Simulation.** Transportation Research Board 97th Annual Meeting, Washington DC, 2017.

SUKENNIK, P. **D2.5 Micro-simulation guide for automated vehicles. CoEXist. V 1.0.** PTV Group, 2018.

ULAK, M. B.; OZGUVEN, E. E.; MOSES, R.; SANDO, T.; BOOT, W.; ABDELRAZIG, Y.; SOBANJOB, J. O. Assessment of traffic performance measures and safety based on driver age and experience: A microsimulation based analysis for an unsignalized t-intersection. **Journal of Traffic and Transportation Engineering**, v. 6, n. 5, p. 455–469, 2019.

WANG, C. **A new simulation-based conflict indicator as a surrogate measure of safety.** University of Kentucky, 2012.

WHO. **Global status report on road safety 2018.** Geneva: World Health Organization, 2018.

WIEDEMANN, R. **Simulation des Verkehrsflusses.** Dissertação do Instituts fuer Verkehrswesen, Heft 8, Uniersitaet Karlsruhe, 1974.

ZHANG, S.; DENG, W.; ZHAO, Q.; SUN, H.; LITKOUHI, B. **Dynamic trajectory planning for vehicle autonomous driving.** 13 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, 2013.