

AVALIAÇÃO DO IMPACTO DE ESTRATÉGIAS DE CONTROLO DE TRÁFEGO EM CRUZAMENTO SEMAFORIZADO ISOLADO

PATRICIA CORDELA TELES

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM GESTÃO DA MOBILIDADE URBANA

Orientadora: Professora Doutora Ana Maria César Bastos Silva

Coorientador: Professor Doutor Álvaro Jorge da Maia Seco

JULHO DE 2021

MESTRADO EM GESTÃO DA MOBILIDADE URBANA 2019/2021

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2014/2015 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2015.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

A Deus, minha família, meus amigos e meu grande amor

*O conhecimento amplia a vida. Conhecer é viver uma realidade que a ignorância impede
desfrutar.*

Carlos Bernardo González Pecotche

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, minha família e meus amigos que estiveram comigo nessa e em todas as etapas da minha vida.

Agradeço especialmente aos meus orientadores, Professora Doutora Ana Maria César Bastos Silva e Professor Doutor Álvaro Jorge da Maia Seco, por todo apoio na elaboração dessa dissertação e por todo o conhecimento partilhado ao longo do mestrado. Agradeço por terem sido minha inspiração na Universidade de Coimbra a seguir meus estudos nesta área.

Agradeço a todos os docentes da Universidade do Porto que tanto me ensinaram e foram recordados ao longo da elaboração dessa dissertação.

Agradeço ao meu parceiro de vida, Eduardo, que sempre esteve ao meu lado colaborando com paciência, amor e compreensão.

Agradeço aos meus colegas de turma e a todos que colaboraram e me apoiaram nesse desafio.

RESUMO

Os cruzamentos representam os pontos de menor capacidade na rede viária, a ser onde ocorrem os maiores índices de sinistros. Em meios urbanos há maior presença de peões, o elemento mais frágil dos sistemas de mobilidade e que compartilha o espaço com os veículos ao longo de suas travessias, a aumentar a probabilidade de acidentes. Essa elevada exposição ao risco gera a necessidade de planejar os cruzamentos a priorizar, além da fluidez do tráfego, a segurança de todos os utentes.

A taxa de procura de veículos e peões são variáveis ao longo do tempo. Desta forma, variam também a saturação dos cruzamentos e seus índices de desempenho. Isso acarreta a necessidade de planejar o funcionamento de um cruzamento de forma flexível e adaptável em função dos níveis de procura, a encontrar a melhor estratégia dentro de cada conjunto de condições impostas, visto que somente um plano de regulação semafórica pode ser insuficiente.

Esta dissertação consiste em estudar um cruzamento semafORIZADO típico no Brasil, onde utilizou-se da ferramenta de microssimulação de tráfego para modelar a combinação de algumas variáveis que constituem os diferentes cenários que se intercalam ao longo do dia. Foram simulados três tipos de controle semafórico (tempos fixos, tempos atuados e tempos fixos com contagem regressiva), os quais combinados com taxas de saturação e débitos pedonais variados reproduzem os cenários que se aproximam da realidade.

Em cada cenário, de um total de 27, obteve-se três indicadores de desempenho para os movimentos motorizados e três para os movimentos pedonais. Em busca de aproximar o modelo da realidade, modelou-se os peões com comportamento desobediente, a fim de conhecer e avaliar o efeito produzido nas diferentes estratégias de regulação. Para isso, 100% dos peões foram considerados desobedientes, ou seja, caso haja oportunidade haverá o desrespeito ao sinal luminoso.

Conclui-se que a vantagem do controle atuado perante o controle fixo ocorre principalmente pela diminuição do atraso dos movimentos veiculares e pedonais. No entanto, quando a taxa de saturação está próxima do limite da capacidade da via, os indicadores independem das estratégias de regulação semafórica, visto que neste caso não há alterações significativas quando comparados entre si.

Ao comparar os controles de tempos fixos sem e com contagem regressiva, modelou-se a alteração de somente um parâmetro (tempo de brecha mínimo), o qual se mostrou suficiente para simular essa alteração de comportamento dos peões, visto que a percentagem de peões desobedientes foi menor na estratégia de tempos fixos com contagem regressiva.

Ainda que seja necessário considerar no modelo diferentes comportamentos veiculares e pedonais, a microssimulação de tráfego se mostrou satisfatória para o estudo de caso, a gerar resultados conforme o esperado.

PALAVRAS-CHAVE: Cruzamento SemafORIZADO, Contagem Semafórica Regressiva, Controle Atuado, Peões Desobedientes, Microssimulação de Tráfego.

ABSTRACT

Crossings represent the lowest capacity points in the road network, to be where the highest accident rates occur. In urban environments there is a greater presence of pedestrians, the most fragile element of mobility systems and who share space with vehicles along their crossings, increasing the probability of accidents. This high risk exposure generates the need to plan intersections prioritizing, besides traffic fluidity, the safety of all users.

The demand rate of vehicles and pedestrians varies over time. Thus, the saturation of intersections and their performance rates also vary. This entails the need to plan the operation of an intersection in a flexible and adaptable way according to demand levels, to find the best strategy within each set of imposed conditions, since only a traffic signal regulation plan may be insufficient.

This dissertation consists of studying a typical signalized intersection in Brazil, where the traffic microsimulation tool was used to model the combination of some variables that constitute the different scenarios that are interspersed throughout the day. Three types of traffic signal control were simulated (fixed times, actuated times, and fixed times with countdown), which combined with different saturation rates and pedestrian flow rates reproduce the scenarios that approximate reality.

In each scenario, out of a total of 27, three performance indicators were obtained for motorized movements and three for pedestrian movements. In an attempt to bring the model closer to reality, pedestrians with disobedient behavior were modeled in order to know and evaluate the effect produced by the different regulation strategies. For this, 100% of the pedestrians were considered disobedient, that is, if there is an opportunity there will be disrespect for the signal light.

It was concluded that the advantage of actuated control over fixed control occurs mainly by reducing the delay of vehicular and pedestrian movements. However, when the saturation rate is close to the limit of road capacity, the indicators are independent of the traffic signal regulation strategies, since in this case there are no significant changes when compared to each other.

When comparing the fixed-time controls without and with countdown, it was modeled the change of only one parameter (minimum gap time), which proved sufficient to simulate this change in pedestrian behavior, since the percentage of disobedient pedestrians was lower in the fixed-time strategy with countdown.

Although it is necessary to consider different vehicular and pedestrian behaviors in the model, the traffic microsimulation proved satisfactory for the case study, generating results as expected.

KEYWORDS: Signalized Intersection, Countdown Signal Control, Actuated Signal Control, Disobedient Pedestrians, Traffic Microsimulation.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO DO TEMA	1
1.2. OBJETO DO ESTUDO, MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS	2
1.3. METODOLOGIA	2
1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO	3
2. REVISÃO DA LITERATURA	5
2.1. CRUZAMENTOS SEMAFORIZADOS	5
2.1.1. CAMPOS DE APLICAÇÃO	5
2.1.2. LEGISLAÇÃO	7
2.1.3. TRAVESSIAS PEDONAIS	7
2.1.4. INTERAÇÃO ENTRE PEÕES E VEÍCULOS	8
2.2. REGULAÇÃO SEMAFÓRICA	10
2.2.1. CONCEITOS	10
2.2.2. TEMPO FIXO	10
2.2.3. TEMPO ATUADO	11
2.2.4. CONTAGEM REGRESSIVA	12
2.3. MODELOS DE MICROSIMULAÇÃO DE TRÁFEGO	13
2.4. LACUNAS NA INVESTIGAÇÃO	14
3. METODOLOGIA DE ANÁLISE	15
3.1. MODELO BASE	15
3.2. ESTRATÉGIAS DE ANÁLISE	16
3.2.1. ESTRATÉGIA DE REGULAÇÃO A TEMPOS FIXOS	16
3.2.2. ESTRATÉGIA DE REGULAÇÃO A TEMPOS ATUADOS	17
3.2.3. ESTRATÉGIA DE REGULAÇÃO A TEMPOS FIXOS COM CONTAGEM REGRESSIVA	18
3.3. CENÁRIOS DE ANÁLISE	18

3.3.1. TAXA DE SATURAÇÃO DOS VEÍCULOS.....	18
3.3.2. DÉBITOS PEDONAIS.....	18
3.4. ESTRATÉGIAS VS CENÁRIOS DE ANÁLISE	19
3.5. INDICADORES DE DESEMPENHO.....	19
3.5.1. INDICADORES RELATIVOS AOS MOVIMENTOS MOTORIZADOS.....	20
3.5.1.1. Atraso veicular.....	20
3.5.1.2. Fila de espera média.....	20
3.5.1.3. Número de paradas.....	21
3.5.2. INDICADORES RELATIVOS AOS MOVIMENTOS PEDONAIS.....	21
3.5.2.1. Nível de densidade.....	21
3.5.2.2. Atraso pedonal	22
3.5.2.3. Percentagem de peões desobedientes.....	22
3.6. DEFINIÇÃO DOS PLANOS DE REGULAÇÃO.....	22
3.6.1. PLANO DE REGULAÇÃO BASE	23
3.6.1.1. Tempo de ciclo	23
3.6.1.2. Transição entre fases veiculares	23
3.6.1.3. Transição entre fases para peões.....	24
3.6.1.4. Tempo perdido	24
3.6.1.5. Temporização do ciclo base	25
3.6.2. ESPECIFICAÇÃO DOS CICLOS SEMAFÓRICOS.....	25
3.6.2.1. Obtenção da capacidade das vias	26
3.6.2.2. Método de Webster	26
3.6.2.3. Cálculo do ciclo para os diferentes cenários de tráfego	27
3.6.2.4. Tempo de ciclo adotados	27
3.7. CENÁRIOS DE PROCURA	29
4. MICROSSIMULAÇÃO	31
4.1. ENQUADRAMENTO	31
4.2. ESTRUTURA DO MODELO	31
4.2.1. PARÂMETROS DA SIMULAÇÃO.....	31
4.2.2. TRATAMENTO DOS MOVIMENTOS MOTORIZADOS	31
4.2.3. TRATAMENTO DOS MOVIMENTOS PEDONAIS.....	33
4.2.4. REGULAÇÃO DOS SINAIS LUMINOSOS.....	34

4.2.5. CONFLITO ENTRE PEÕES E VEÍCULOS	36
4.3. CALIBRAÇÃO	38
4.3.1. MOVIMENTOS MOTORIZADOS	38
4.3.2. MOVIMENTOS PEDONAIS	40
4.4. SIMULAÇÃO E RESULTADOS	41
4.4.1. PARÂMETROS DA SIMULAÇÃO E DOS RESULTADOS	41
4.4.2. PROCESSO DE OBTENÇÃO DOS RESULTADOS	41
5. RESULTADOS E ANÁLISES	43
5.1. ENQUADRAMENTO	43
5.2. INDICADORES DE MOVIMENTOS MOTORIZADOS	43
5.2.1. COMPRIMENTO MÉDIO DA FILA	43
5.2.2. ATRASO VEICULAR.....	46
5.2.3. NÚMERO DE PARADAS	48
5.3. INDICADORES DE MOVIMENTOS PEDONAIS	50
5.3.1. DENSIDADE MÉDIA.....	51
5.3.2. ATRASO PEDONAL	52
5.3.3. PERCENTAGEM DE PEÕES DESOBEDIENTES.....	55
5.4. AVALIAÇÕES GERAIS	57
6. CONCLUSÕES	59
6.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	59
6.2. INVESTIGAÇÕES FUTURAS	60
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 – Cores, significados e ação dos condutores	6
Fig. 2 – Cores, significados e ação dos peões	6
Fig. 3 – Exemplo de sinais luminosos em duas formas de sustentação	6
Fig. 4 – Exemplo de travessia pedonal semaforizada atuada por botoeira	8
Fig. 5 – Representação de movimentos veiculares e de peões em uma interseção de duas vias de sentido único	9
Fig. 6 – Contagem regressiva por indicação luminosa	12
Fig. 7 – (a) Contagem regressiva numérica (b) Contagem regressiva para peões	12
Fig. 8 – Modelo base do cruzamento em análise	15
Fig. 9 – Fluxograma da lógica de funcionamento da estratégia semafórica a tempos fixos	17
Fig. 10 – Fluxograma da lógica de funcionamento da estratégia semafórica a tempos atuados	17
Fig. 11 – Árvore de possibilidades	19
Fig. 12 – Ciclo semafórico genérico	23
Fig. 13 – Representação do modelo construído no <i>software</i> Vissim	32
Fig. 14 – Representação da modelação dos peões no <i>software</i> Vissim	33
Fig. 15 – Plano de regulação semafórica base no <i>software</i> Vissim	34
Fig. 16 – Forma de criação de plano de regulação semafórica atuada no <i>software</i> Vissim	35
Fig. 17 – Lógica criada no módulo VisVAP para regulação semafórica atuada	35
Fig. 18 – Representação da colocação da ferramenta <i>priority rules</i>	37
Fig. 19 – Parâmetros utilizados na calibração do <i>lane change</i>	39
Fig. 20 – Criação de nó e seções para obtenção dos resultados	42
Fig. 21 – Exemplo de dados de saída para obtenção da porcentagem de peões desobedientes	42
Fig. 22 – Comprimento médio da fila do movimento principal com taxa de saturação de 30%	44
Fig. 23 – Comprimento médio da fila do movimento principal com taxa de saturação de 60%	45
Fig. 24 – Comprimento médio da fila do movimento principal com taxa de saturação de 90%	45
Fig. 25 – Comprimento médio da fila do movimento secundário com taxa de saturação de 30%	45
Fig. 26 – Comprimento médio da fila do movimento secundário com taxa de saturação de 60%	46
Fig. 27 – Comprimento médio da fila do movimento secundário com taxa de saturação de 90%	46
Fig. 28 – Áreas de análise dos movimentos pedonais	51
Fig. 29 – Atraso médio pedonal na área de espera 1 com taxa de saturação de 30%	53
Fig. 30 – Atraso médio pedonal na área de espera 1 com taxa de saturação de 60%	53
Fig. 31 – Atraso médio pedonal na área de espera 1 com taxa de saturação de 90%	54

Fig. 32 – Atraso médio pedonal na área de espera 2 com taxa de saturação de 30%	54
Fig. 33 – Atraso médio pedonal na área de espera 2 com taxa de saturação de 60%	54
Fig. 34 – Atraso médio pedonal na área de espera 2 com taxa de saturação de 90%	55
Fig. 35 – Percentagem de peões desobedientes com taxa de saturação de 30%.....	56
Fig. 36 – Percentagem de peões desobedientes com taxa de saturação de 60%.....	56
Fig. 37 – Percentagem de peões desobedientes com taxa de saturação de 90%.....	56

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 – Classe da estrada, tipos de travessia e solução recomendada	7
Quadro 2 – Vantagens e desvantagens por tipo de controlo.....	11
Quadro 3 – Desafios encontrados na literatura na simulação de peões e veículos.....	13
Quadro 4 – Nível de Serviço para veículos em cruzamentos semaforizados	20
Quadro 5 – Nível de Serviço para peões em áreas de espera e passadeiras	21
Quadro 6 – Nível de Serviço para peões em função do atraso médio	22
Quadro 7 – Temporização do ciclo semaforico base	25
Quadro 8 – Capacidade das vias com ciclo semaforico base	26
Quadro 9 – Cálculo do ciclo para diferentes taxas de saturação	27
Quadro 10 – Temporização do ciclo a tempos fixos	28
Quadro 11 – Temporização do ciclo a tempos atuados	28
Quadro 12 – Fluxo de veículos para cada taxa de saturação proposta	29
Quadro 13 – Parâmetros utilizados no modelo <i>car following</i> do <i>Wiedaman 74</i>	39
Quadro 14 – Parâmetros para calibração dos peões	40
Quadro 15 – Atraso médio veicular do movimento em frente da via principal	47
Quadro 16 – Atraso médio veicular do movimento de viragem à direita da via principal	47
Quadro 17 – Atraso médio veicular do movimento em frente da via secundária	48
Quadro 18 – Atraso médio veicular do movimento de viragem à esquerda da via secundária	48
Quadro 19 – Número de paradas por veículo do movimento em frente da via principal.....	49
Quadro 20 – Número de paradas por veículo do movimento de viragem à direita da via principal	49
Quadro 21 – Número de paradas por veículo do movimento em frente da via secundária	50
Quadro 22 – Número de paradas por veículo do movimento de viragem à esquerda da via secundária	50
Quadro 23 – Densidade média na travessia pedonal	51
Quadro 24 – Densidade média na área de espera 1	52
Quadro 25 – Densidade média na área de espera 2	52

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO DO TEMA

Nas últimas décadas, os veículos motorizados têm recebido grande ênfase no planejamento das cidades, de forma que o modo pedonal por vezes foi desprezado. Como consequência, nota-se maior surgimento de problemas ambientais em que a principal causa é o tráfego motorizado. Nos espaços urbanos comumente são identificados baixos níveis de segurança e conforto dedicados aos peões, entretanto, o modo pedonal tem potencial de ser uma alternativa ao uso do automóvel em trajetos de menores distâncias (Seco et al., 2008).

O ambiente urbano das grandes cidades tem adquirido um aspecto multimodal nas últimas décadas. Contudo, boa parte da população ainda tem preferido utilizar modos de transporte motorizados individuais para suas viagens diárias, provocando uma saturação das redes viárias urbanas que, por sua vez, estimula a busca por meios de transporte alternativos (Bandeira, 2019).

A busca pelo desincentivo ao uso de modos de transportes motorizados tem estimulado a comunidade científica a dar maior atenção ao estudo do funcionamento dos modos alternativos, como o modo pedonal. Os movimentos e interações dos peões entre si e com outros usuários dos sistemas de transportes em diferentes contextos urbanos têm sido tema central de muitos estudos.

Conforme destacam Friss e Svenson (2013), a maioria das viagens começam e terminam a pé independente de outros modos de transporte utilizados, o que denota a importância dos peões no sistema de transportes. Portanto, a compreensão do comportamento dos peões é importante para que os gestores públicos criem e implementem políticas e projetos que englobem a diversidade do ambiente urbano.

Neste contexto, destacam-se as diferentes tipologias de cruzamentos viários urbanos, uma vez que estes pontos se tornam gargalos para os veículos (devido à perda da capacidade) e exposição ao risco aos peões, visto haver competição pelo mesmo espaço com os veículos motorizados ao longo da travessia, sendo assim, altamente vulnerável em uma rede viária.

Com o objetivo de sanar esses conflitos e proteger os peões, uma das soluções típicas é a implementação de sinalização semafórica. Ainda que se apresente como uma boa solução, se essa sinalização for mal projetada, pode-se aumentar, ainda mais, o tempo de espera dos peões ou mesmo estimular a sua desobediência, aumentando a exposição ao risco. Assim, se faz relevante estudar diferentes configurações semafóricas e seus impactos no desempenho dos veículos e peões, bem como, analisar os impactos de cada solução no que diz respeito à obediência dos peões no momento da travessia.

Este documento centra-se na apresentação e avaliação de diferentes configurações semaforicas aplicadas a um cruzamento em cruz, tendo por base um conjunto de cenários de análises e de indicadores de desempenho, recorrendo ao recurso de *software* de microsimulação de tráfego. Cada solução associa-se a diversas vantagens e desvantagens para os veículos e peões em termos de desempenho. Assim, esse estudo representa um contributo na atualização dos conhecimentos, tanto em termos de bibliografia específica, quanto na tomada de decisão em situações reais.

1.2. OBJETO DO ESTUDO, MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS

Tendo em vista a importância do conhecimento de diferentes tipologias de cruzamento em função dos movimentos permitidos e sua respectiva regulação semaforica, bem como, considerando o contexto da realidade brasileira e do comportamento dos peões em função de sua obediência e sua interação com os demais modos de transporte, busca-se responder a seguinte pergunta de investigação:

Quais os impactos no desempenho dos movimentos motorizados e pedonais quando aplicadas diferentes estratégias de regulação semaforica, num cruzamento em cruz, tendo por base diferentes cenários de procura ao longo do dia?

A fim de responder essa pergunta, a presente dissertação tem como objetivo avaliar os parâmetros de diferentes regulações semaforicas para cenários distintos num cruzamento hipotético brasileiro, considerando o conflito entre peões e veículos, por meio da microsimulação de tráfego, a fim de perceber quais as vantagens e desvantagens associadas a cada estratégia, bem como auxiliar na tomada de decisão.

1.3. METODOLOGIA

O objetivo desta dissertação, centra-se na avaliação do desempenho dos movimentos motorizados e pedonais para três diferentes estratégias de regulação semaforica: temporização fixa, temporização atuada e temporização fixa com contagem regressiva.

Para reproduzir a variabilidade das situações presentes ao longo do dia em função das condições de tráfego, definiu-se um conjunto de cenários que alteram o fluxo de peões que atravessam a via no movimento conflituante com todos os movimentos veiculares e o fluxo de tráfego motorizado.

Para analisar as diferentes estratégias semaforicas em cada um dos diferentes cenários, recorreu-se a construção de um modelo de microsimulação de tráfego com a utilização do *software* Vissim, juntamente com sua extensão Viswalk, o qual permite que os peões modelados se movam livremente em duas dimensões espaciais, representando assim resultados mais realistas.

A construção do modelo integrou a modelação dos movimentos motorizados, posteriormente os movimentos pedonais, a criação das regulações dos sinais luminosos e por fim o tratamento dos conflitos entre peões e veículos.

A simulação no *software* foi feita de forma a permitir que os peões tenham comportamentos desobedientes, ou seja, caso tenham a oportunidade de realizar o atravessamento durante o tempo de vermelho pedonal, os peões serão oportunistas e desobedientes à regulação semaforica e irão realizar a travessia. Visto que não é possível determinar com certeza quais os peões que são caracterizados como oportunistas, pois só se comprova essa caracterização quando o peão tem um comportamento desobediente, considerou-se que todos os peões serão potencialmente desobedientes e irão realizar a travessia se tiverem oportunidade.

Por fim, geraram-se simulações para cada estratégia nos diferentes cenários, sendo possível assim avaliar o desempenho dos movimentos motorizados e pedonais, bem como analisar os pontos positivos e negativos de cada estratégia.

1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO

A presente dissertação foi elaborada seguindo uma estrutura subdividida em seis capítulos.

Primeiramente, na introdução, faz-se uma contextualização quanto ao enquadramento geral, sendo apresentado o objeto de estudo, motivação, objetivos e metodologia do trabalho, bem como a estrutura do documento.

No segundo capítulo, apresenta-se o estado da arte referente a literatura do tema em questão e os principais aspectos dos trabalhos desenvolvidos que podem servir para esta dissertação.

No terceiro capítulo aborda-se a metodologia aplicada no estudo.

No quarto capítulo é apresentada a modelação da microssimulação de tráfego de forma detalhada.

No quinto capítulo são apresentados os resultados obtidos do modelo e suas respectivas análises.

Por fim, no sexto e último capítulo referente às conclusões, constam as considerações finais e recomendações para trabalhos futuros.

2

REVISÃO DA LITERATURA

2.1. CRUZAMENTOS SEMAFORIZADOS

Conforme Seco et al. (2008), o desempenho das redes viárias dos espaços urbanos, que pode ser caracterizado pela sua capacidade e segurança, está diretamente ligado ao funcionamento dos cruzamentos, visto que esses constituem habitualmente os pontos críticos da rede, por serem os locais onde tendencialmente se registra incapacidade de atender a procura, bem como onde ocorrem cerca de dois terços de todos os acidentes com feridos e mortos.

A implantação de sinais luminosos em um cruzamento é uma forma de fazer a gestão do tráfego, o que permite a realização de movimentos conflitantes em tempos distintos, a evitar conflitos e reduzir o índice de sinistros da interseção.

2.1.1. CAMPOS DE APLICAÇÃO

Dentro do contexto de uma rede viária, surgem cruzamentos que, seja por questões geométricas ou por procura elevada, passam a se tornar críticos, tanto pela alta taxa de saturação ou pelo elevado índice de sinistralidade. Frente a esses problemas, alternativas como a prioridade de passagem, soluções geométricas e até mesmo rotundas, podem revelar-se ineficazes. Surge então a necessidade de avaliar outras medidas, como obras de infraestrutura com vista ao desnivelamento de pelo menos alguns movimentos – de elevados custos de implantação – ou a semaforização do cruzamento.

De acordo com Seco et al. (2008), o recurso à sinalização luminosa em cruzamentos de nível surge como uma medida de gestão de tráfego cujo custo de instalação e manutenção é relativamente baixo, mas que apresenta níveis de eficácia elevados, não se limitando apenas a intervir na dimensão espacial considerada nas outras soluções, mas também na dimensão temporal, a organizar o uso do espaço do cruzamento.

Tendo surgido em Londres no ano de 1868, desde então, os sinais luminosos se consolidaram como uma solução aceita em múltiplos países e continentes, com características físicas e de funcionamento praticamente universais, facilitando a compreensão dos condutores em qualquer lugar do mundo.

De acordo com o Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN, 2014), as cores que regulam um sistema semaforístico típico brasileiro, seu respectivo significado e a ação do usuário da via, seguem apresentadas nas Figura 1 e na Figura 2, referente aos condutores e peões, respectivamente. Em seguida, na Figura 3, constam dois exemplos de sustentação dos sinais luminosos veiculares.




COR	SINAL	SIGNIFICADO	AÇÃO DO USUÁRIO DA VIA
Vermelha		Indica a proibição do direito de passagem	Obrigatoriedade do condutor em parar o veículo
Amarela		Indica o término do direito de passagem.	O condutor deve parar o veículo salvo se não for possível imobilizá-lo em condições de segurança.
Verde		Indica a permissão do direito de passagem.	O condutor tem a permissão de iniciar ou prosseguir em marcha, podendo efetuar os movimentos de acordo com a indicação luminosa e observar as normas de circulação e conduta.

Fig. 1 – Cores, significados e ação dos condutores (CONTRAN, 2014)




FORMA	COR	SINAL	SIGNIFICADO	AÇÃO DO USUÁRIO DA VIA
Quadrada	Vermelha		Indica para o pedestre a proibição da travessia	O pedestre não deve iniciar a travessia
	Vermelha (intermitente)		Indica para o pedestre o término do direito de iniciar a travessia. Sua duração deve permitir a conclusão das travessias iniciadas no tempo de verde.	O pedestre não deve iniciar a travessia. O pedestre que já iniciou a travessia no tempo de verde deve concluí-la, atentando para o fato de que os veículos estão prestes a receber indicação luminosa verde.
	Verde		Indica para o pedestre a permissão do direito de travessia	O pedestre tem a permissão de iniciar a travessia

Fig. 2 – Cores, significados e ação dos peões (CONTRAN, 2014)

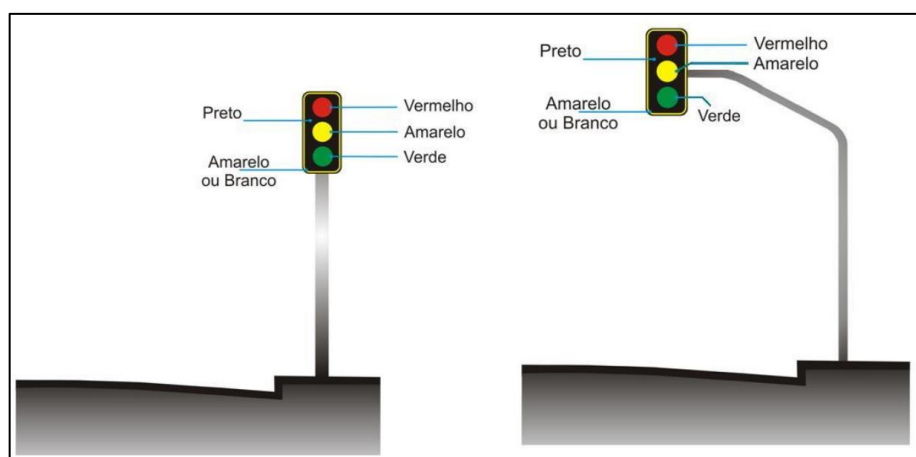


Fig. 3 – Exemplo de sinais luminosos em duas formas de sustentação (CONTRAN, 2014)

2.1.2. LEGISLAÇÃO

O Código de Trânsito Brasileiro – CTB (1997) regulamenta o trânsito de qualquer natureza nas vias terrestres do território nacional. Em seu Art. 89.º, a ordem de prevalência da sinalização é primeiramente pelas ordens do agente de trânsito sobre as normas de circulação e outros sinais, e em seguida tem-se as indicações semaforicas sobre os demais sinais. Ainda, no Art. 70.º é salientado que os peões não possuem prioridade de passagem mesmo em faixas delimitadas para esse fim quando houver sinalização semaforica.

Portanto, quando houver sinais luminosos permitindo a passagem dos veículos em um cruzamento, o peão não possui a preferência mesmo em locais sinalizados de travessia, o que demonstra uma priorização dos veículos motorizados perante os peões no Brasil.

2.1.3. TRAVESSIAS PEDONAIS

Situações em que há uma elevada procura de tráfego sobre locais de travessia de peões, a comprometer sua segurança, são propícias para a implantação de sinais luminosos. O projetista deve se atentar quanto à visibilidade do peão, a reduzir sempre que possível o comprimento da travessia e consequentemente, a exposição ao risco. A velocidade dos veículos também deve ser adequada, sendo necessário em alguns casos a implantação de dispositivos de acalmia de tráfego para redução da velocidade antes da travessia.

A regulação por sinais luminosos nas travessias deve estar em conformidade com a hierarquia da via, conforme Austroads (1995). No Quadro 1 segue a relação entre a hierarquia da via e os tipos de travessia recomendáveis, a destacar que a solução recomendável do tipo “semaforizada” é normalmente recomendável em vias do tipo Distribuidora Principal.

Quadro 1 – Classe da estrada, tipos de travessia e solução recomendada (Austroads, 1995)

CLASSE DA ESTRADA	TRAVESSIA DESNIVELADA	TRAVESSIA DE NÍVEL	
		PASSAGEM PEDONAL	SEMAFORIZADO
Coletora	I	N.A.	II
Distribuidora principal	II	II	I
Distribuidora local	N.A.	I	II
Acesso local	N.A.	I	N.A.

I – Normalmente recomendável; II – Às vezes recomendável; N.A. – Não aplicável

De acordo com Seco et al. 2008, em uma travessia regulada por sinais luminosos e integrada num cruzamento pode-se adotar algumas das seguintes soluções:

- Em situações de baixo volume de peões, os atravessamentos podem ser efetuados nos períodos sem tráfego num dado ramo da estrada não existindo, assim, sinalização luminosa específica para peões;

- Existência de uma fase exclusiva para peões. Nesta situação há impedimento temporário dos movimentos do tráfego automóvel. Pode, eventualmente, acarretar alguns atrasos penalizando os veículos em relação a situações em que há uma junção de movimentos quer de peões, quer de veículos;
- Criação de fases em que há avanço simultâneo de peões e de movimentos de viragem, com os veículos a dar prioridade aos peões na travessia. Essa solução não é aplicável no Brasil devido a sua legislação;
- Solução com atravessamento em duas fases, usando uma ilha de refúgio para o peão esperar em segurança uma fase que lhe permita terminar o atravessamento. Esta solução poderá ser combinada com uma travessia enviesada.

Tipicamente, as travessias pedonais estão situadas em cruzamentos ou em alguma seção da via. Na hipótese de haver controlo semafórico, este pode ser atuado por uma botoeira nas extremidades na passeadeira, o qual fornece a oportunidade de passagem ao peão através da abertura da fase pedonal, ou possuir um tempo fixo, a abrir e fechar aos peões ciclicamente. Na Figura 4 consta um exemplo de travessia com atuação por botoeira em todas as entradas nas passeadeiras.

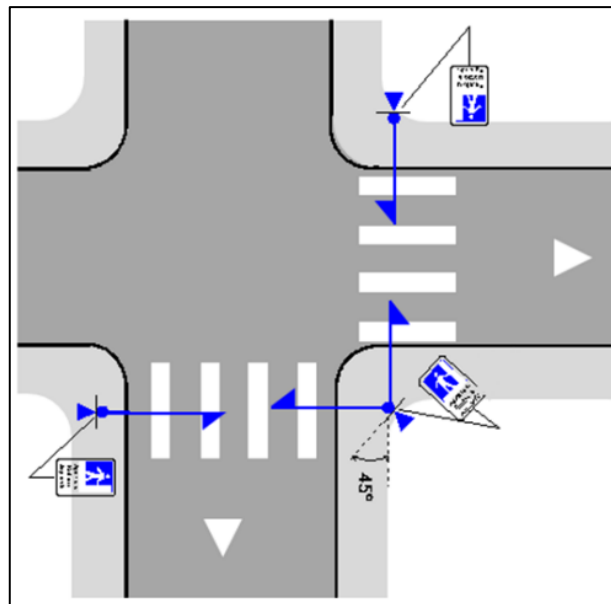


Fig. 4 – Exemplo de travessia pedonal semaforzada atuada por botoeira (CONTRAN, 2014)

2.1.4. INTERAÇÃO ENTRE PEÕES E VEÍCULOS

O local onde ocorrem as principais interações entre peões e veículos são nas travessias de peões. A exposição ao risco de acidentes e atrasos nos deslocamentos são causados devido a essa interação.

O CONTRAN (2014) apresenta na Figura 5 um exemplo dos movimentos veiculares permitidos e seus respectivos conflitos com as travessias pedonais referentes a um cruzamento de vias de sentido único.

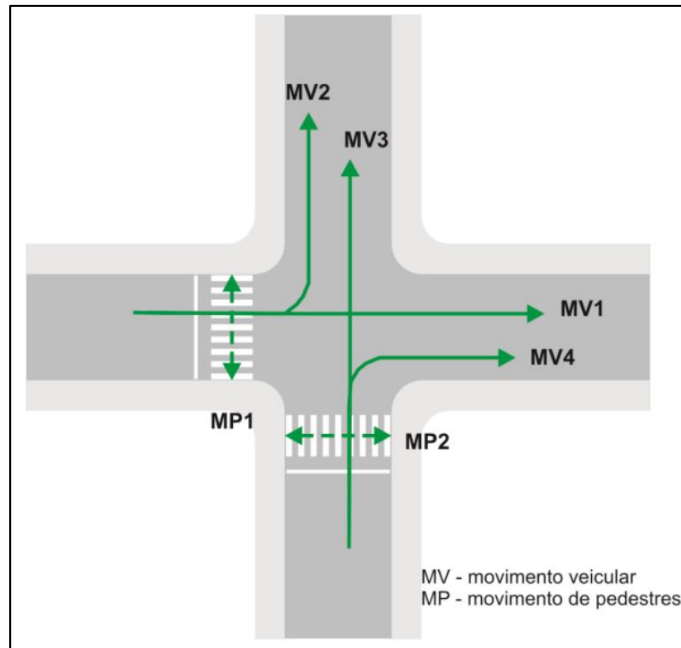


Fig. 5 – Representação de movimentos veiculares e de peões em uma interseção de duas vias de sentido único (CONTRAN, 2014)

Os movimentos pedonais apresentados na Figura 5 indicam que o peão realiza a travessia perpendicular à via no local da passadeira. Porém, o estudo de Jacobsen (2011) analisou a trajetória percorrida pelos peões nas travessias e constatou que eles utilizam uma área maior que a delimitada pela passadeira. Inclusive, muitas travessias são realizadas na diagonal. Isso se deve à existência de barreiras físicas, condições do tráfego, momento em que o peão chega na travessia e a sua origem e destino, o que pode fazê-lo encurtar o trajeto.

Além da trajetória do peão durante a travessia, é de se destacar o comportamento do peão nessa zona de conflito e como isso pode impactar no fluxo veicular. A seguir, discorrer-se-á sobre estudos que tratam do tema e trazem resultados relevantes para a presente dissertação.

Conforme Golakiya e Dhamaniya (2019), na maior parte dos países em desenvolvimento, como o Brasil, os peões atravessam a via em seções isoladas para aceder a locais de seu interesse. Isso implica, em alguns casos, na interrupção forçada do fluxo veicular e, conseqüentemente, incremento no atraso dos veículos. Buscando estimar esse atraso nos pontos de travessia em seções isoladas na Índia, os autores coletaram dados de duas cidades altamente povoadas e aplicaram modelos estatísticos. Concluíram não existir diferenças significativas no atraso dos veículos entre os diferentes métodos de análise utilizados, mas que esse atraso varia em função do tipo de veículo; ou seja, para veículos de menor porte com maior capacidade de manobra, observou-se menos atraso em comparação com veículos de maior porte com menor capacidade de manobra.

Langbroek et al. (2013) cita que a violação à luz vermelha entre os peões é uma questão de segurança importante. De acordo com pesquisas em diferentes cruzamentos na cidade australiana de Brisbane, o risco de se envolver em um acidente de trânsito ao violar o sinal vermelho é 8,1 vezes maior em comparação ao risco ao obedecer ao sinal de trânsito (King et al., 2009). No entanto, muitos peões optam por violar o sinal vermelho em vez de esperar. Por fim, o autor cita que a violação da luz vermelha depende de vários fatores pessoais, culturais, de infraestrutura e fatores relacionados à aplicação.

De acordo com Liu et al. (2000), o peão obediente é aquele que realiza a travessia somente na fase pedonal. Já o peão oportunista ou desobediente é aquele que aguarda por um período e, após, realiza a travessia no tempo de vermelho pedonal, a aproveitar as brechas dos veículos. Ainda conforme a pesquisa, nas travessias em vias de sentido duplo o peão avalia um sentido por vez, independentemente da existência de refúgio central.

Yang et al. (2006) aplicou questionários para avaliar a influência dos peões oportunistas sobre os obedientes. Como resultado, obteve que 69% dos peões obedientes podem ter atitudes dos oportunistas quando outros peões desrespeitam o sinal luminoso. Mediante esse comportamento, pode-se classificar o peão como influenciado.

Bandeira (2019) aponta uma diferença fundamental entre peões oportunistas e violadores: oportunista é o peão que procura lacunas para realizar a travessia independentemente da indicação do sinal; se um oportunista encontra e aceita uma brecha para atravessar a via durante o tempo de vermelho, ele se torna um violador. Assim, embora todos os infratores sejam necessariamente oportunistas, um oportunista não se tornará necessariamente um infrator - é possível que o sinal mude para o tempo de verde antes que o peão oportunista encontre uma brecha adequada.

2.2. REGULAÇÃO SEMAFÓRICA

2.2.1. CONCEITOS

A fim de entender o funcionamento de um sistema de sinais luminosos, salienta-se alguns conceitos-base importantes para uma regulação semafórica (Seco et al., 2008).

- Ciclo: é a sequência completa das indicações de uma sinalização semafórica, referindo-se ao intervalo de tempo em que a programação se repete;
- Fase: representa o intervalo de tempo que uma ou várias correntes de tráfego têm o direito de avançar, enquanto o restante dos fluxos está interrompido;
- Tempo de transição: representa o intervalo de tempo entre o fim de uma fase e antes do início da fase seguinte, sendo composta pelo tempo de amarelo e tempo de limpeza, garantindo assim uma transição com segurança;
- Tempo de amarelo: tem por objetivo avisar os condutores que a mudança para o sinal vermelho está próxima;
- Tempo de limpeza: representa o tempo de vermelho geral do movimento que acabou de ter sua fase terminada, a fim de que todos os veículos possam ultrapassar todos os pontos de conflitos com outras correntes de tráfego.

2.2.2. TEMPO FIXO

Conforme CONTRAN (2014), o controle em tempo fixo utiliza planos semafóricos calculados com base em dados de tráfego disponíveis, obtidos por contagens de volumes e outros levantamentos de campo. O controle pode ser efetuado com base em um único plano semafórico, ou na adoção de planos específicos para atender a demanda de tráfego histórica de períodos distintos do dia e de diferentes dias da semana. Ao longo do período de ação de um plano semafórico, o tempo de ciclo, a sequência de fases, a duração dos intervalos luminosos e a defasagem, no caso das redes semafóricas, são mantidos constantes.

2.2.3. TEMPO ATUADO

O CONTRAN (2014) define que o controlo atuado decorre do monitoramento da demanda de tráfego na interseção, mediante a implantação de detetores de tráfego em todas ou em algumas de suas aproximações, permitindo alterações nos tempos das fases. O princípio básico do funcionamento em modo totalmente atuado é o da determinação do tempo de verde associado a cada fase de sinalização, variando entre um valor mínimo e um valor máximo pré-estabelecidos. Esse tipo de controlo pode permitir o ajuste, em tempo real, dos valores de alguns dos parâmetros de programação, como por exemplo, a prioridade a ser dada para uma aproximação congestionada.

As vantagens e desvantagens na comparação entre tempo fixo e o tempo atuado estão apresentadas no Quadro 2.

Quadro 2 – Vantagens e desvantagens por tipo de controlo (CONTRAN, 2014)

TIPO DE CONTROLE	VANTAGENS	DESVANTAGENS
Tempo fixo	<ul style="list-style-type: none"> ✓ A elaboração da programação e sua implantação em campo são simples no caso da operação isolada e em redes pequenas. ✓ Custo de implantação e operação inferior ao do controlo atuado. ✓ Quando bem programado, levando em conta a variação do tráfego ao longo do dia, tem desempenho satisfatório. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Planos semafóricos elaborados com dados de volume que não refletem a real situação do tráfego podem gerar excessivo atraso para veículos e pedestres. ✓ Requer coleta periódica de dados de tráfego para assegurar a qualidade dos planos semafóricos, o que implica em custos elevados. ✓ Pouco eficiente para o controlo em locais, ou períodos do dia, em que o volume de tráfego sofre muitas variações. ✓ A determinação dos planos para a operação coordenada exige conhecimentos específicos.
Atuado	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Desempenho favorável no controlo do tráfego em situações de volume muito variável. ✓ Minimiza tempos de verde ociosos. ✓ É o mais indicado para o controlo de travessias de pedestres em meio de quadra, quando a sinalização semafórica for justificada. ✓ O controlo atuado permite a omissão de estágios. Na situação de múltiplos estágios, o aspecto de segurança deve ser cuidadosamente observado. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ O custo de implantação e manutenção do sistema atuado é mais elevado do que o de tempo fixo. ✓ Nem todos os controladores podem operar em modo totalmente atuado. ✓ A instalação dos detetores é dispendiosa e requer inspeção e manutenção periódicas para sua adequada operação. ✓ A definição dos parâmetros para a operação dos controladores atuados, especialmente no controlo totalmente atuado, exige conhecimentos específicos.

2.2.4. CONTAGEM REGRESSIVA

De acordo com a Companhia de Engenharia de Tráfego – CET (2016), sinais luminosos com contagem regressiva além de mostrarem a cor do sinal luminoso, mostram também o tempo restante que lhe está associado. A contagem regressiva pode ser associada aos sinais luminosos quer dos veículos quer dos peões.

A indicação luminosa veicular pode se dar através de luzes que se apagam gradativamente (Figura 6) ou através de números que decrescem com o tempo (Figura 7). Quanto aos peões, usualmente, a contagem regressiva é feita por meio de números decrescentes, a exemplo da Figura 7.



Fig. 6 – Contagem regressiva por indicação luminosa

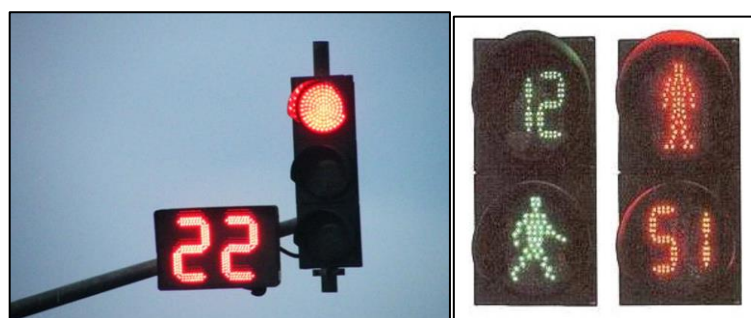


Fig. 7 – (a) Contagem regressiva numérica (b) Contagem regressiva para peões

É importante salientar que esse tipo de semáforo não está regulamentado pelo Código de Trânsito Brasileiro – CTB, que no seu Art. 80, define:

Art. 80 – Sempre que necessário, será colocada ao longo da via, sinalização prevista no Código de Trânsito Brasileiro e em legislação complementar, destinada a condutores e pedestres, vedada a utilização de qualquer outra.

(...)

§2º O CONTRAN poderá autorizar, em caráter experimental e por período prefixado, a utilização de sinalização não prevista no Código de Trânsito Brasileiro. O CONTRAN editará normas complementares no que se refere à interpretação, colocação e uso da sinalização.

O sinal luminoso com contagem regressiva gera uma alteração no comportamento de peões e veículos quando comparado ao sinal luminoso sem contagem regressiva. Conforme o estudo de Xiong et al.

(2014), o qual compara o comportamento dos peões em dois cruzamentos semaforizados com características geométricas similares, porém um com regulação semafórica tradicional e outro com regulação semafórica com contagem regressiva, conclui-se que os sinais de contagem regressiva podem aumentar significativamente a proporção de peões cumpridores e reduzir a proporção de infratores. Ainda, o estudo de Matos (2020) chega a conclusões semelhantes, porém salienta que há múltiplos fatores que tendem a influenciar a forma como os peões se comportam nesse tipo de travessia, como a hora de ponta em contraste com fora da hora de ponta, influência da caminhada isolada ou em grupo, bem como o tempo expectável de espera.

2.3. MODELOS DE MICROSIMULAÇÃO DE TRÁFEGO

Conforme Friis e Svensson (2013), as simulações de tráfego são um método estabelecido na análise de fluxos de veículos, onde o Vissim é um dos *softwares* de microsimulação mais utilizado. A mesma empresa que desenvolveu o Vissim, a *Planung Transport and Verkehr AG* (PTV), desenvolveu um *software* adicional chamado Viswalk, utilizado especificamente para simulação de peões. O estudo de Friis e Svensson (2013), teve como objetivo investigar o valor agregado que o Viswalk pode acrescentar nas simulações, neste caso, em Gotemburgo. O estudo mostrou que existem várias áreas de aplicações onde os *softwares* Vissim e Viswalk podem ser utilizados. Por fim, concluiu que em cenários complexos em que há grande volume de peões o Viswalk pode agregar valor, sobretudo porque a sua configuração é menos exigente e o resultado visual reflete a realidade com maior precisão.

Werberich (2013) compilou em um quadro as principais dificuldades da simulação de peões e veículos de acordo com a literatura, como pode-se visualizar no Quadro 3.

Quadro 3 – Desafios encontrados na literatura na simulação de peões e veículos

DESAFIOS	OBSERVAÇÕES
Movimentação de veículos	Modelos de <i>Car Following</i> (Gripps, 1981) e <i>Lane Changing</i> (Gripps, 1986) descrevem a movimentação de veículos de forma realista, entretanto são muito distintos dos modelos de movimentação de peões
Movimentação de peões	Modelos de Forças Sociais (et. Al., 1995) e baseados em Campos de Força (Pretto et al., 2008) conseguem reproduzir comportamentos emergentes de grupos de peões
Ambientes de travessia	Jacobsen (2011) identificou limitações dos modelos de simulação comerciais na representação das travessias. Muitos comportamentos descritos na literatura não são representados em simuladores
Ambientes compartilhados	Os modelos propostos por Anvari et. Al (2012) e Schönauer et al. (2012) estão em fase inicial de desenvolvimento
Tomada de decisão dos agentes	Lakoba et al. (2005) e Zainnudin e Shuaib (2010) apontam a tomada de decisão dos agentes de forças sociais como um dos aspectos a serem desenvolvidos na modelagem de peões
Escolha de rotas	Papadimitriou et. Al. (2009) identificou em uma exaustiva revisão bibliográfica a fraqueza dos modelos em representar aspectos das travessias na escolha de rotas

O autor complementa apresentando outros problemas enfrentados na simulação conjunta de peões e veículos, como:

- A criação de modelos matematicamente semelhantes para representar tanto peões quanto veículos, de forma a tornar a interação entre os agentes mais natural, a possibilitar a representação de ambientes compartilhados;
- Agregar aos agentes a capacidade de tomar decisões baseadas em regras, principalmente para representar o respeito à sinalização, possibilitando a simulação de ambientes de travessia;
- Agregar à escolha de rotas dos peões a influência das diversas possibilidades de locais de travessia considerando dificuldade das travessias, volume de tráfego, dentre outros.

O autor conclui os estudos a mencionar que a inclusão de novos comportamentos nos modelos dos peões, principalmente durante a sua travessia, apresenta maior realismo à simulação e acarretam num impacto significativo nos resultados do modelo.

Entretanto, os modelos de microssimulação fornecem parâmetros de saída que auxiliam diretamente na análise de desempenho tanto dos veículos quanto dos peões, mais precisamente, comprimento de fila médio, atraso e nível de serviço.

Jacobsen (2011) salienta que na modelagem de travessias de peões no *software* Vissim, os principais comportamentos representados correspondem à movimentação de peões (modelo de Forças Sociais); interação entre peões e veículos (modelo de aceitação de brechas em áreas de conflito); e decisão sobre desrespeitar os sinais luminosos.

Bandeira (2019) propôs um método para a modelação microscópica do atraso de peões em travessias semaforizadas, dada a escassez de trabalhos científicos nessa área. Ele analisou quatro cruzamentos distintos, cada um com uma taxa de violação relacionada à disponibilidade de brechas. Todos os peões foram considerados oportunistas devido à dificuldade de estimar a proporção real desse tipo de comportamento. No final, concluiu que nenhum dos parâmetros do modelo de Força Social teve impacto significativo na estimativa do atraso dos peões nos cruzamentos semaforizados.

2.4. LACUNAS NA INVESTIGAÇÃO

Os *softwares* de microssimulação de tráfego são considerados ferramentas eficazes como apoio a tomada de decisões, por permitirem testar e avaliar estratégias antes de sua implantação, sendo possível analisar o funcionamento de um sistema, identificar suas deficiências e desenvolver soluções.

Ainda, a salientar o modo pedonal e sua vulnerabilidade em situações de conflito de travessias, em especial quando ocorre a desobediência aos sinais luminosos, percebe-se a importância de avaliar o desempenho de um cruzamento semaforizado.

Portanto, visto a lacuna de pesquisa de análise de cruzamentos semaforizados em ambiente urbano brasileiro, quer na perspectiva do peão, quer do veículo, utilizando software de microssimulação de tráfego, optou-se por este tema de pesquisa, onde espera-se no futuro que esse documento sirva para trabalhos na área de transportes e mobilidade, sobretudo na análise relativa a melhorias da operação de cruzamentos semaforizados semelhantes.

3

METODOLOGIA DE ANÁLISE

3.1. MODELO BASE

O estudo realizado no âmbito desta dissertação tem por objetivo avaliar, recorrendo a diferentes indicadores de desempenho de movimentos motorizados e pedonais, a eficácia de diferentes tipologias de regulação semafórica aplicados a um cruzamento semaforizado isolado com 4 ramos.

Os centros urbanos brasileiros possuem no geral características de um sistema viário com traçado retilíneo ortogonal, onde comumente faz-se uso da solução do tipo “binários”, mais precisamente, vias paralelas de sentido intercalado. Devido a isso, o *layout* escolhido para a análise representa uma tipologia de interseção comum nos principais centros urbanos do Brasil (ver Figura 8). Salienta-se a existência de sinais luminosos nas aproximações veiculares, inclusive para os peões.

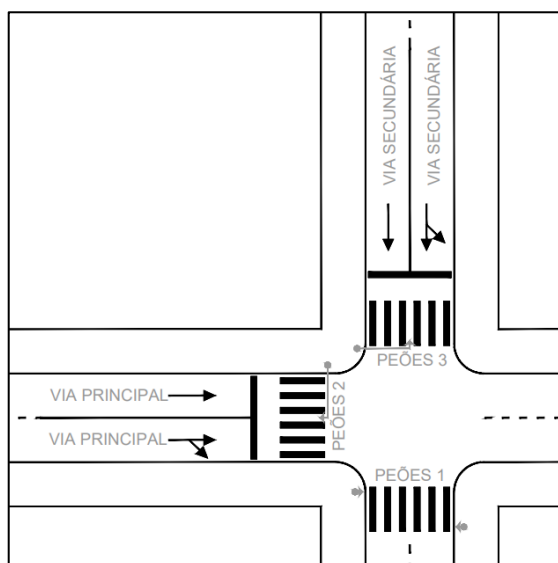


Fig. 8 – Modelo base do cruzamento em análise

Optou-se por desenvolver um estudo de caso de forma virtual, com o auxílio do microssimulador Vissim cedido pelo Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Porto, de forma a gerar um modelo generalizado base representativo desse tipo de cruzamento.

Ainda, utilizou-se como inspiração o cruzamento da Avenida Brasil com a Rua 1500 no município de Balneário Camboriú, Santa Catarina, Brasil, o qual possui funcionamento similar ao representado na Figura 8. Ao longo do trabalho utilizaram-se alguns parâmetros semelhantes ao observado nesse cruzamento para a criação de um cruzamento genérico no microssimulador.

Utilizou-se referências de Portugal e do Brasil, de modo a combinar as restrições legislativas brasileiras com as melhores práticas de engenharia portuguesas.

Foram testadas estratégias de regulação a tempos fixos e tempos atuados, além de tempo fixo com contagem regressiva, o qual provoca alterações no comportamento dos condutores e peões.

Para que ocorra o atravessamento de todos os peões sem conflitos, nessa tipologia de cruzamento, é necessária uma estratégia de no mínimo três fases. No entanto, quando a estratégia é a de tempos fixos, podem ocorrer esperas desnecessárias devido à ausência da procura de peões ou veículos em qualquer das aproximações do cruzamento. Por isso, também se optou pela análise de uma estratégia a três fases com tempos atuados, de forma a diminuir o tempo de espera de todos os movimentos. Por fim, foram alterados parâmetros de comportamento dos peões a fim de representar a estratégia de três fases a tempo fixo com contagem regressiva. Tendo essa variedade de regulações semaforicas, foi possível analisar por meios dos indicadores de desempenho as vantagens e desvantagens associadas a cada uma das estratégias pré-definidas.

Observa-se na Figura 8 que o movimento “Peões 2” ocorre enquanto o movimento da via principal dos veículos estiver com o tempo de vermelho. Da mesma forma, o movimento “Peões 3” ocorre quando o movimento da via secundária estiver com o tempo de vermelho. Portanto, foi analisado somente o movimento “Peões 1”, que é o movimento conflituante em ambas as fases veiculares, visto esse ser o movimento responsável pela obrigatoriedade de no mínimo três fases, bem como pelo fato dos movimentos “Peões 2” e “Peões 3” ocorrem junto com a fase veicular e não afetarem a regulação a tempo atuado.

Ainda, para generalizar os cenários de análise e obter resultados que representem a realidade dos cruzamentos urbanos, foram alternadas as taxas de saturação dos veículos e o volume de peões do movimento conflituante, a representar assim os diferentes cenários que ocorrem ao longo do dia.

O objetivo é que com essa variabilidade de cenários e diferentes estratégias de regulação, seja possível perceber, por meio dos indicadores de desempenho, qual das estratégias é a mais adequada para responder a cada cenário.

3.2. ESTRATÉGIAS DE ANÁLISE

Visto que a legislação brasileira não regulamenta o atravessamento pedonal com oposição, a instituir que o veículo tem prioridade mediante regulação semaforica, todas as estratégias de análise contiveram três fases a fim de dispor sempre de uma fase exclusiva para os peões.

3.2.1. ESTRATÉGIA DE REGULAÇÃO A TEMPOS FIXOS

A estratégia de regulação a tempos fixos de três fases consiste em duas fases para os veículos, iniciando pela aproximação principal e depois na secundária, e uma fase exclusiva para os peões.

A duração da fase dos peões será invariável e terá tempo de fase em verde e em vermelho intermitente conforme define o Código de Trânsito Brasileiro – CTB (1997), enquanto a duração da fase para cada aproximação dos veículos varia em função da taxa de saturação considerada em cada cenário estudado, sendo calculado o ciclo ótimo, ciclo mínimo e tempo de verde veicular em cada caso. Porém, a fase mantém uma ordem constante e todas as fases serão ativadas independentemente de haver ou não veículos ou peões à espera.

A lógica do cruzamento a tempos fixos de três fases é apresentada na Figura 9.

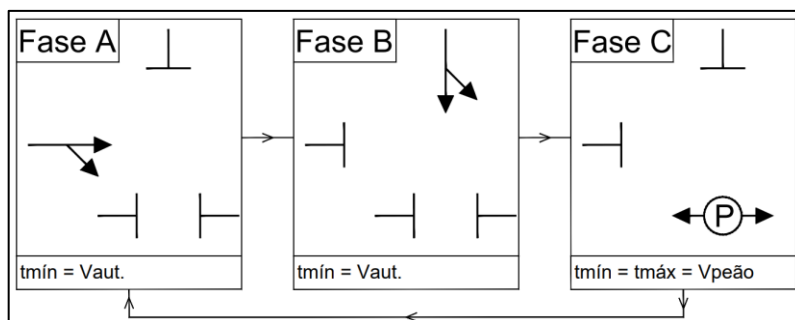


Fig. 9 – Fluxograma da lógica de funcionamento da estratégia semaforica a tempos fixos

3.2.2. ESTRATÉGIA DE REGULAÇÃO A TEMPOS ATUADOS

A estratégia de regulação a tempo atuado permite que as fases tenham durações variáveis em função da procura de cada aproximação veicular, bem como permite diminuir tempos de espera dos peões que podem ter sua fase ativada antecipadamente mediante detecção.

De forma análoga à estratégia a tempo fixo, a estratégia a tempo atuado também possui três fases, sendo duas para os veículos e uma exclusiva para os peões.

Pode-se observar na Figura 10 a lógica da regulação. O ciclo inicia pela fase da via principal; caso haja detecção na via secundária dar-se-á liberação da fase após atingir o tempo mínimo de verde daquela fase; se não, é possível que essa fase não seja ativada e seja ativada diretamente a fase do peão, caso, entretanto seja detectada procura. Caso não haja procura da via secundária e nem do peão, o verde da fase A é estendido no tempo.

Salienta-se que mesmo que haja nova procura na fase que estiver ativada, não haverá a lógica de extensão de fase, sendo o tempo mínimo de verde igual ao tempo máximo para a fase B e fase C. Optou-se por esse tipo de lógica de atuação pela simplificação da criação da lógica no microsimulador, assim como criar um ciclo semaforico menor, que traz mais rapidez na atuação da fase pedonal.

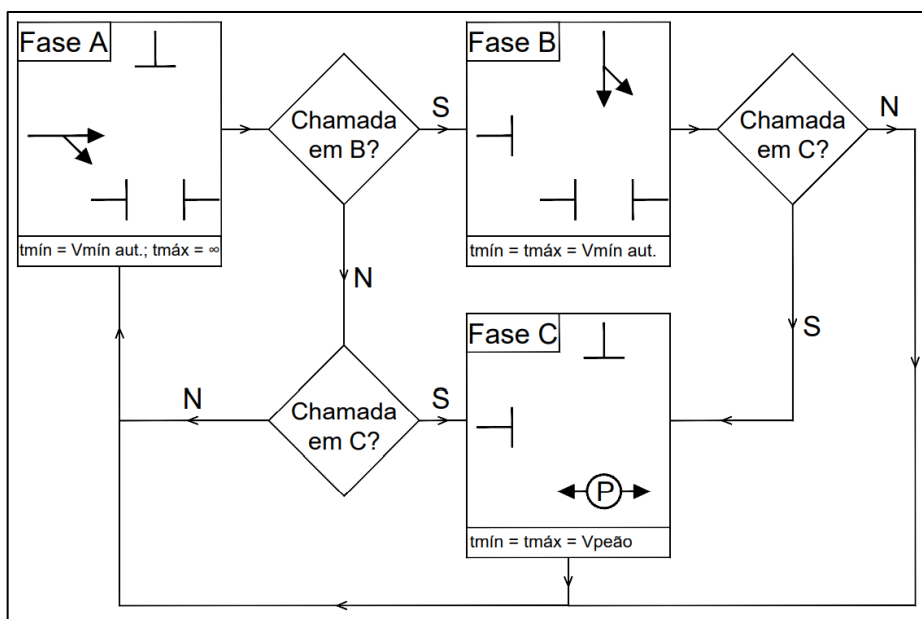


Fig. 10 – Fluxograma da lógica de funcionamento da estratégia semaforica a tempos atuados

Nessa estratégia, a fim de reduzir o tempo de espera do peão, ao invés de utilizar os tempos de verdes calculados com base no ciclo ótimo, optou-se por utilizar os tempos de verde calculados com base no ciclo mínimo, diminuindo assim os tempos da fase veicular para o tempo mínimo, sempre respeitando o tempo mínimo de ciclo para que não ocorra o congestionamento. Assim, além do ciclo ser de duração reduzida, caso não haja demanda veicular, a fase pedonal será ativada antecipadamente.

3.2.3. ESTRATÉGIA DE REGULAÇÃO A TEMPOS FIXOS COM CONTAGEM REGRESSIVA

A estratégia a tempo fixo com contagem regressiva é semelhante a estratégia de tempos fixos, sendo, no entanto, introduzida uma alteração ao comportamento dos peões resultante da existência do sistema de contagem regressiva. Como concluíram Xiong et al. (2014) e Matos (2020), os sinais luminosos com contagem regressiva podem reduzir significativamente a proporção de peões infratores, pelo que, se alterou o comportamento dos peões de forma que ocorra uma maior obediência aos sinais luminosos.

3.3. CENÁRIOS DE ANÁLISE

Foi testada uma variedade de cenários para garantir consistência nos resultados, tendo-se variado a taxa de saturação dos veículos e os débitos pedonais do movimento conflituante.

3.3.1. TAXA DE SATURAÇÃO DOS VEÍCULOS

É comum em quaisquer centros urbanos que as taxas de saturação veiculares ao longo do dia sejam variadas, alcançando altas taxas durante os horários de ponta e baixas taxas em horários de menor procura, como durante a madrugada, por exemplo.

A fim de considerar os diferentes cenários ao longo do dia, fez-se variar a taxa de saturação dos veículos entre 90%, 60% e 30%, representando respectivamente as horas de ponta, momentos de média procura e de baixa procura.

Como indica Costa et. al (2008), *“é desejável que o grau de saturação relativamente a qualquer corrente de tráfego do cruzamento não ultrapasse um determinado valor entre 0,80 e 0,90, genericamente designado grau de saturação máxima admissível”*.

Considerando que uma via que opera no limite ou acima de sua capacidade não traz resultados relevantes para a análise de um cruzamento semaforizado quando comparado a cenários com menor procura veicular, pois tem como *output* valores que destoam muito entre os cenários, optou-se por utilizar o máximo de 90% de taxa de saturação da via.

Salienta-se que a proporção de veículos que realizam a conversão à direita a partir da via principal e à esquerda da via secundária se manteve constante em 30% na conversão e 70% em frente.

3.3.2. DÉBITOS PEDONAIS

Com foco na análise de indicadores relativos ao desempenho dos peões, além de buscar perceber como a variação do número de peões que são carregados na rede impacta no fluxo veicular, foi realizada a variação dos débitos pedonais do atravessamento conflituante a fim de perceber entre as estratégias em análise quais são as mais impactantes, quer na perspectiva do veículo, quer na perspectiva do peão. Para o efeito, fez-se variar o número de peões entre 100, 300 e 500 peões por hora por sentido.

3.4. ESTRATÉGIAS VS CENÁRIOS DE ANÁLISE

Foi gerada uma árvore das diferentes estratégias de regulação juntamente com os diferentes cenários (Figura 11). As estratégias utilizadas foram:

- Tempo fixo a 3 fases;
- Tempo atuado a 3 fases;
- Tempo fixo com contagem regressiva a 3 fases.

E a variabilidade de cenários utilizados foram:

- Taxa de saturação: 90%; 60%; a 30%;
- Débito pedonal: 100; 300; 500 peões/hora/sentido.

Desta combinação de situações resultaram 9 cenários diferentes aplicados a cada uma das 3 estratégias em análise e avaliação, num total de 27 combinações.

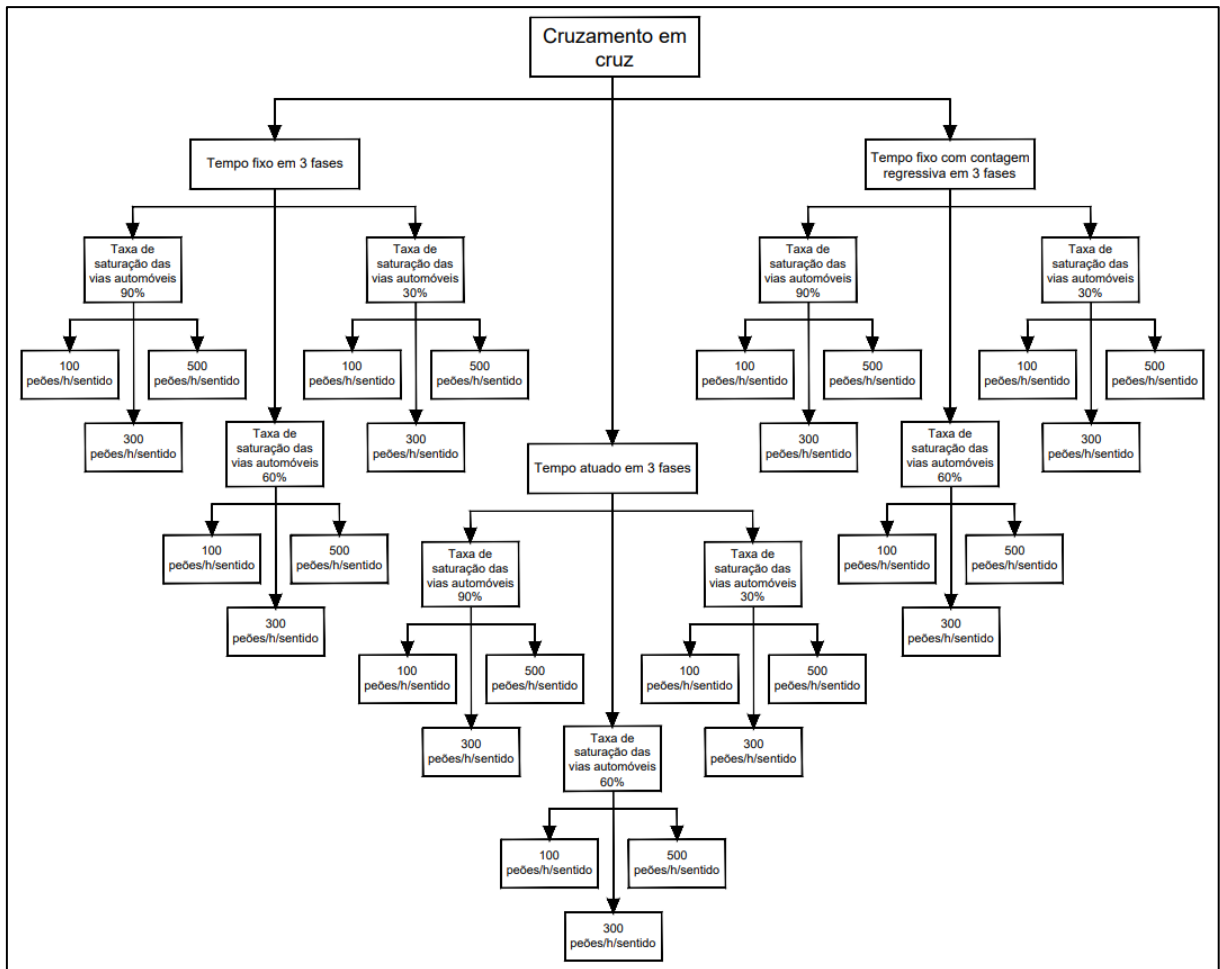


Fig. 11 – Árvore de possibilidades

3.5. INDICADORES DE DESEMPENHO

A fim de analisar as condições de funcionamento de cada um dos cenários de análise, com suas respectivas estratégias de regulação, foi selecionada e depois quantificada uma série de indicadores de

desempenho. Os indicadores, por serem globais, refletem o funcionamento de todo o cruzamento, relativos quer aos veículos quer aos peões. Salienta-se que para garantir a possibilidade de comparação entre os diferentes cenários, os indicadores analisados em cada cenário são sempre os mesmos.

Tendo por base a ferramenta de microsimulação Vissim, foram considerados seis diferentes indicadores, sendo três para caracterização dos movimentos veiculares e três para os pedonais.

3.5.1. INDICADORES RELATIVOS AOS MOVIMENTOS MOTORIZADOS

3.5.1.1. Atraso veicular

O tempo de atraso em um cruzamento semaforizado visa medir a espera causada aos veículos devido à existência de sinais luminosos. O atraso representa a diferença entre o tempo de viagem real – tempo que o veículo leva para percorrer determinado trecho sob a influência do controlo semafórico – e o tempo de viagem teórico – tempo de viagem que poderia ser alcançado se não houvesse outros veículos e/ou nenhum controlo de sinais luminosos ou outros motivos para paradas.

Ainda, o *Highway Capacity Manual* (HCM, 2016), no capítulo 19, salienta que uma medida de desempenho de um cruzamento regulado por sinais luminosos é o atraso, a partir do qual é definido o Nível de Serviço (LOS) conforme Quadro 4 (Níveis de Serviço para rácio do volume sobre capacidade menor do que um).

Quadro 4 – Nível de Serviço para veículos em cruzamentos semaforizados (HCM, 2016)

LOS	ATRASSO (s/veíc)
A	≤ 10
B	10 – 20
C	20 – 35
D	35 – 55
E	55 – 80
F	≥ 80

Ressalta-se que o *software* Vissim dispõe desse dado como o atraso médio sofrido por todos os veículos em cada um dos movimentos.

3.5.1.2. Fila de espera média

Considerando que o cruzamento deveria funcionar abaixo de sua capacidade máxima, por serem introduzidas taxas de saturação de veículos abaixo dos 100%, entende-se que a fila de veículos formada durante o tempo de vermelho tenderá a ser totalmente dissipada no tempo de verde. O indicador fila de espera média representa o comprimento médio da fila de espera de todos os veículos, expresso em metros, e é muitas vezes usado na avaliação das condições de armazenamento das filas a

montante das entradas nos cruzamentos. Esse indicador é calculado pelo *software* para cada uma das aproximações.

3.5.1.3. Número de paradas

O número de paradas é um dos principais indicadores de qualidade da operação do trânsito, visto que um alto número de paradas, além de gerar desconforto ao condutor, aumenta o tempo de percurso, o consumo de combustível e a emissão de poluentes, os quais têm grande impacto sobretudo nos centros urbanos.

Esse indicador é obtido no *software* na forma de número de paradas por veículo.

3.5.2. INDICADORES RELATIVOS AOS MOVIMENTOS PEDONAIS

3.5.2.1. Nível de densidade

Existem diferentes formas de avaliar o Nível de Serviço dos peões, uma delas, como sugere o HCM (2000), é por meio do espaço disponível para mobilidade. Esse espaço é tratado de forma diferente para as áreas de espera de travessia e a passadeira. Nas áreas de espera, os peões ficam temporariamente a aguardar o momento da travessia, enquanto as passadeiras conectam os passeios e os peões estão em movimento. Neste estudo avaliou-se o nível de densidade nas áreas de espera, bem como na passadeira.

Visto que o *software* disponibiliza o valor de densidade média de peões na unidade peões/m², está apresentado no Quadro 5 os Níveis de Serviço em função da densidade de peões em cada tipo de espaço pedonal.

Quadro 5 – Nível de Serviço para peões em áreas de espera e passadeiras (HCM, 2000)

LOS	ÁREAS DE ESPERA	PASSADEIRA
	DENSIDADE (peão/m ²)	
A	≤ 0,83	≤ 0,18
B	0,83 – 1,11	0,18 – 0,27
C	1,11 – 1,66	0,27 – 0,45
D	1,66 – 3,33	0,45 – 0,71
E	3,33 – 5,00	0,71 – 1,33
F	≥ 5,00	≥ 1,33

3.5.2.2. Atraso pedonal

Outra forma de avaliar o Nível de Serviço dos peões, é por meio do atraso médio enfrentado pelos peões nos atravessamentos semaforizados. Esse indicador é obtido em segundos pelo *software* e foi avaliado para as duas áreas de espera de travessia existentes.

De acordo com os critérios do HCM (2000), está apresentado no Quadro 6 os Níveis de Serviço em função do atraso médio dos peões para cruzamentos semaforizados.

Quadro 6 – Nível de Serviço para peões em função do atraso médio (HCM, 2000)

LOS	TEMPO MÉDIO DE ESPERA (s/peão)
A	< 10
B	≥ 10 – 20
C	> 20 – 30
D	> 30 – 40
E	> 40 – 60
F	> 60

3.5.2.3. Percentagem de peões desobedientes

A simulação no *software* Vissim foi desenvolvida de forma a permitir que os peões tenham comportamentos desobedientes, ou seja, caso tenham a oportunidade de realizar o atravessamento durante o tempo de vermelho pedonal. Esses peões foram designados de oportunistas e desobedientes à regulação semafórica, por realizar a travessia durante o tempo de vermelho.

Esse indicador é dado pela proporção (em %) dos peões oportunistas que de facto conseguem realizar o atravessamento nas brechas, desrespeitando assim o sinal semafórico.

Visto que o *software* não disponibiliza esse indicador automaticamente, foi necessário sobrepor os dados de saída dos peões e regulações semafóricas a fim de encontrar esse indicador.

3.6. DEFINIÇÃO DOS PLANOS DE REGULAÇÃO

O presente trabalho centra-se no desenvolvimento das análises aplicadas a um cruzamento semaforizado, pelo que é necessário estabelecer um plano de regulação, portanto, o ciclo semafórico.

Inicialmente calculou-se um plano de regulação base que serve como ponto de partida para a especificação dos ciclos semafóricos para cada estratégia semaforizada. Calcularam-se os tempos perdidos, os quais se mantiveram constantes nas diferentes estratégias e cenários analisados.

Com a temporização finalizada do plano de regulação base, foi possível sobressaturar a rede simulada com veículos motorizados, a fim de obter a capacidade da via principal e secundária com os seus

respectivos tempos de verde. Com essa capacidade e os tempos de verdes adotados, encontrou-se o débito de saturação de cada uma das aproximações.

Com o débito de saturação definido para cada aproximação, calculou-se os débitos veiculares e índices de carga para a via principal e secundária, bem como o ciclo ótimo e ciclo mínimo para as diferentes taxas de saturação. Por fim, calculou-se e determinou-se os tempos de ciclo e de verde veicular para a estratégia a tempos fixos, bem como para a estratégia a tempos atuados, em função das diferentes taxas de saturação.

3.6.1. PLANO DE REGULAÇÃO BASE

3.6.1.1. Tempo de ciclo

A sequência completa das indicações dos sinais luminosos gera um ciclo, sendo o conjunto de cada uma das fases para veículos e peões, bem como os tempos de limpeza de cada fase.

Conforme Costa et. al (2008) a duração de um ciclo deve estar compreendida entre 30 e 120 segundos por razões de operacionalidade, comodidade e segurança. Visto a situação genérica proposta tratar de um centro urbano com três fases, optou-se por adotar um tempo máximo de ciclo de 110 segundos. Salienta-se que o ciclo irá variar em função do ciclo ótimo para cada nível de saturação de tráfego, respeitando sempre o ciclo mínimo prático, bem como uma duração mínima de 8 segundos para cada fase veicular.

Subtraiu-se do ciclo máximo proposto o tempo perdido, sendo esse o período de transição entre fases e o tempo da fase pedonal. Após isso, repartiu-se o tempo de verde restante para cada uma das fases veiculares em função do índice de carga; para isso, tomou-se como cenário hipotético que a via principal tem o tráfego mais carregado que a via secundária de forma a necessitar de 70% do tempo de verde restante no ciclo.

Em termos genéricos, apresenta-se na Figura 12 o ciclo semafórico.



Fig. 12 – Ciclo semafórico genérico

3.6.1.2. Transição entre fases veiculares

Após o fim de uma fase veicular e antes do início da fase consecutiva existe um tempo de transição, o qual ocorre por razões de segurança e consiste no tempo de amarelo somado ao tempo de tudo vermelho para limpeza.

Por se tratar de um modelo genérico em um centro urbano, o tempo de amarelo conforme Costa et. al (2008) tem a duração de 3 segundos para velocidades correntes.

O tempo de vermelho para limpeza pode ser calculado pela Equação 1 (Costa et. al, 2008).

$$tl_{(T,I)} = \left(\frac{d_T + d_v}{v_T} - \frac{d_I}{v_I} \right) \quad (1)$$

Onde:

$tl_{(T,l)}$ = tempo de limpeza entre correntes de tráfego, em segundos;

d_T = distância entre a barra de paragem do movimento que termina e o ponto crítico, em metros;

d_l = distância entre a barra de paragem do movimento que inicia e o ponto crítico, em metros;

v_T = velocidade do veículo que inicia o movimento, em m/s (usualmente 10 m/s);

v_l = velocidade do veículo que termina o movimento, em m/s (usualmente 10 m/s);

d_v = comprimento típico dos veículos, em metros (usualmente 5,0 m).

Calculou-se o tempo de vermelho de limpeza na transição entre fases de veículos:

$$tl_{(T,l)} = \left(\frac{(0,4 + 1,6 + 4 + 1 + 4,5) + 5,0}{11,11} - \frac{(0,4 + 1,6 + 4 + 1 + 1,5)}{11,11} \right) = 0,8 \cong 1,0 \text{ s}$$

3.6.1.3. Transição entre fases para peões

Conforme o Código de Trânsito Brasileiro – CTB (1997), o controlo do fluxo de peões é feito por meio de sinalização semafórica nas cores: verde, vermelha e vermelha intermitente. O intervalo de vermelho intermitente deve ser suficiente para que o peão que iniciou a travessia no intervalo de verde possa concluí-la com segurança na velocidade normal de caminhada. Portanto, o tempo de transição entre fases para peões é composto pelo intervalo de vermelho intermitente, seguido do tempo de vermelho geral para limpeza. O tempo do intervalo de vermelho intermitente pode ser calculado pela Equação 2 e deve atender o peão que estiver na posição mais desfavorável da travessia.

$$t_{ent} = t_{pr} + \frac{l}{v_p} \quad (2)$$

Onde:

t_{ent} = tempo do intervalo de vermelho intermitente, em segundos;

t_{pr} = tempo de percepção e reação do peão, em segundos;

l = extensão da travessia, em metros;

v_p = velocidade do peão, em m/s.

Usualmente o tempo de percepção e reação do peão é de 1,0 s e a sua velocidade na ordem de 1,2 m/s (CONTRAN, 2014). Portanto, calculou-se o tempo do intervalo de vermelho intermitente:

$$t_{ent} = 1,0 + \frac{6}{1,2} = 6,0 \text{ s}$$

Ainda, tem-se sempre um tempo de vermelho geral para limpeza de duração mínima de um segundo (Costa et al., 2008).

3.6.1.4. Tempo perdido

É a soma do tempo de transição entre duas fases consecutivas, seja entre veículo e veículo, entre veículo e peão e entre fases de peão e veículo, com o tempo de verde e vermelho intermitente para

travessia de peões. São considerados tempos perdidos, pois são tempos desaproveitados para circulação das correntes de veículos.

Para fins de simplificação de cálculos, o tempo perdido no arranque é assumido compensado pelo tempo adicional de passagem.

O tempo de verde pedonal não depende da extensão do atravessamento, mas sim do volume de peões. Visto não haver nenhuma legislação brasileira que determine qual o tempo de verde para os peões, optou-se como sugere Costa et. al (2008) um valor de 6 segundos.

Portanto, somando os tempos perdidos do ciclo tem-se:

$$\text{tempo perdido} = (3 + 1) + (3 + 1) + (6 + 6 + 1) = 21 \text{ segundos}$$

3.6.1.5. Temporização do ciclo base

O tempo restante do ciclo, 89 segundos, é o tempo útil aos veículos da via principal e secundária (fase A e B). Foi feita uma distribuição de 70% e 30% desse tempo, respectivamente, tendo como referência os débitos veiculares correspondentes. Segue no Quadro 7 a temporização adotada.

Quadro 7 – Temporização do ciclo semafórico base

PERÍODO	INDICAÇÃO LUMINOSA	TEMPORIZAÇÃO (seg.)
A	Verde para principal	62
B	Amarelo para principal	3
C	Vermelho geral entre veículos	1
D	Verde para secundária	27
E	Amarelo para secundária	3
F	Vermelho geral entre veículo e peão	1
G	Verde para peão	6
H	Vermelho intermitente para peão	6
I	Vermelho geral entre peão e veículo	1

3.6.2. ESPECIFICAÇÃO DOS CICLOS SEMAFÓRICOS

Foi necessário definir os ciclos semafóricos considerando cada uma das realidades de tráfego propostas, tomando como base a estratégia base calculada.

3.6.2.1. Obtenção da capacidade das vias

A fim de obter a capacidade (Q) da via principal e da via secundária, utilizou-se o ciclo semafórico base já calculado, com seus respectivos tempos perdidos e sobressaturou-se o cruzamento por meio da microssimulação de tráfego com 6000 veículos/hora na via principal e 3000 veículos/hora na via secundária. Assim, foi possível obter o número de veículos que efetivamente conseguem atravessar a via principal e secundária com suas respectivas características geométricas e operacionais. Salienta-se que foi utilizado o valor da média de 10 replicações da simulação (*number of runs*).

Segue no Quadro 8 as informações relativas à determinação das capacidades para a via principal e a via secundária, considerando a sobressaturação no *software* Vissim.

Quadro 8 – Capacidade das vias com ciclo semafórico base

TEMPO DE CICLO = 110 s			
Tempo de verde (via principal)	62 s	Capacidade (via principal)	2.024 veíc/h
Tempo de verde (via secundária)	27 s	Capacidade (via secundária)	978 veíc/h

Esses valores representam o número de veículos que concluíram o percurso de atravessar a via principal e a via secundária durante uma hora de simulação, sendo essa a capacidade em um cenário onde 70% do tempo de verde é disponibilizado para a via principal devido ao maior fluxo de tráfego motorizado, com um tempo de ciclo semafórico máximo de 110 segundos e para os tempos perdidos considerados.

3.6.2.2. Método de Webster

Utilizando o Método de Webster (Webster, 1958 apud Costa et al., 2008), foi calculado o ciclo semafórico considerando os diferentes cenários de taxa de saturação de veículos na estratégia de regulação a tempos fixos com três fases.

Com o valor da capacidade máxima das vias em um cenário com um ciclo semafórico de 110 segundos, é possível obter o débito de saturação (S) de cada uma das aproximações por meio da Equação 3 onde C representa o tempo de ciclo e g a duração do tempo de verde útil cedido ao movimento em análise.

$$S = \frac{Q \times C}{g} \quad (3)$$

É o índice de carga de cada uma das fases que varia os valores do ciclo ótimo para cada cenário, visto que o tempo perdido é constante independente da taxa de saturação veicular. O índice de carga da fase i (y_i) é dado pela Equação 4, onde q_i é o débito de veículos e S_i é o débito de saturação, ambos da fase i . O débito de veículos para a via principal e secundária considerou taxas de saturação de 90%, 60% e 30%, bem como a capacidade da via obtida pela sobressaturação do modelo.

$$y_i = \frac{q_i}{S_i} \quad (4)$$

O ciclo ótimo (C_o) é determinado em função da soma dos tempos perdidos (L) e do índice de carga do cruzamento (Y), conforme Equação 5.

$$C_o = \frac{1,5L + 5}{1 - Y} \quad (5)$$

Já o ciclo mínimo (C_{min}) é calculado pela Equação 6 e possui as mesmas variáveis do ciclo ótimo.

$$C_{min} = \frac{L}{1 - Y} \quad (6)$$

Por fim, a duração do tempo de verde da fase i é dada pela Equação 7.

$$g_i = y_i \frac{C - L}{Y} \quad (7)$$

3.6.2.3. Cálculo do ciclo para os diferentes cenários de tráfego

Visto que se propôs três diferentes cenários de tráfego, com 90%, 60% e 30% de taxa de saturação, calculou-se os valores de ciclo ótimo e ciclo mínimo, conforme apresentado no Quadro 9.

Quadro 9 – Cálculo do ciclo para diferentes taxas de saturação

Taxa de saturação	x	90%	60%	30%
Débito de saturação (principal)	S_1 (uvl/h)		3591	
Débito de veículos (principal)	Q_1 (uvl/h)	1822	1214	607
Índice de carga (principal)	y_1	0,51	0,34	0,17
Débito de saturação (secundário)	S_2 (uvl/h)		3984	
Débito de veículos (secundário)	Q_2 (uvl/h)	880	587	293
Índice de carga (secundário)	y_2	0,22	0,15	0,07
Tempos perdidos	L (s)		21	
Índice de carga do cruzamento	Y	0,73	0,49	0,24
Ciclo ótimo	C_o (s)	134	71	48
Ciclo mínimo	C_{min} (s)	77	46	29

3.6.2.4. Tempos de ciclo adotados

Dentre as três diferentes estratégias de regulação semaforica é necessário prever dois planos diferentes: um para a estratégia a tempos fixos de 3 fases, o qual servirá também para a estratégia de

contagem regressiva; e outro para a estratégia a tempos atuados de 3 fases que possuirá um tempo de verde em função do ciclo mínimo para cada fase veicular.

Salienta-se que é necessário respeitar os valores de ciclo mínimo e ainda, conforme recomendação de Costa et. al (2008), a duração mínima do tempo de verde em cada fase veicular normalmente é fixada em 8 segundos.

Segue no Quadro 10 a determinação do tempo de ciclo para a estratégia de regulação semafórica a tempos fixos, juntamente com o tempo de verde adotado para a via principal e via secundária. Salienta-se que se optou pela adoção do ciclo ótimo na taxa de saturação de 60% e 30%, enquanto se optou pelo tempo de ciclo já definido anteriormente para a taxa de saturação a 90%, respeitando o tempo mínimo de ciclo.

Quadro 10 – Temporização do ciclo a tempos fixos

TAXA DE SATURAÇÃO	TEMPO FIXO		
	Ciclo adotado (s)	Verde adotado para veículos da via principal (s)	Verde adotado para veículos da via secundária (s)
90%	110	62	27
60%	70	34	15
30%	48	19	8

Para a estratégia atuada, adotaram-se os tempos de ciclo iguais ao ciclo mínimo, de forma a minimizar tanto a espera para o movimento veicular, como a espera dos peões. Sendo assim o tempo de verde mínimo foi calculado e adotado na maior parte dos casos, porém, ressalta-se que o tempo de verde veicular calculado para a via principal e secundária no cenário com taxa de saturação de 30% mediante o índice de carga ficou abaixo dos 8 segundos mínimos, de forma que se adotou a fase mínima de 8 segundos para a via principal e secundária. Segue no Quadro 11 a determinação do ciclo para a estratégia de regulação semafórica a tempos atuados, juntamente com o tempo de verde adotado para a via principal e via secundária.

Quadro 11 – Temporização do ciclo a tempos atuados

TAXA DE SATURAÇÃO	TEMPO ATUADO		
	Ciclo adotado (s)	Verde adotado para veículos da via principal (s)	Verde adotado para veículos da via secundária (s)
90%	77	39	17
60%	46	17	8
30%	37	8	8

3.7. CENÁRIOS DE PROCURA

Após a codificação da rede e sua calibração, é necessário que ela seja carregada com os valores de fluxo veicular e fluxo pedonal.

Em relações aos peões, de forma a observar os diferentes resultados mediante diferentes procuras pedonais, foram realizadas simulações com procura no valor de 100, 300 e 500 peões por hora e por sentido.

Em relação aos veículos, utilizando as fases do ciclo semaforico base a três fases, sobressaturou-se o modelo com 6000 veículos/hora na via principal e 3000 veículos/hora na via secundária, o que resultou em uma capacidade de 2059 veículos na via prioritária e 975 veículos na via secundária. Com isso, pode-se obter o fluxo de veículos para carregar a rede para cada taxa de saturação (Quadro 12).

Quadro 12 – Fluxo de veículos para cada taxa de saturação proposta

TAXA DE SATURAÇÃO	FLUXO DE VEÍCULOS DA VIA PRINCIPAL (uvl/h)	FLUXO DE VEÍCULOS DA VIA SECUNDÁRIA (uvl/h)
90%	1822	880
60%	1214	587
30%	607	293

Com os ciclos definidos para cada uma das estratégias, bem como os cenários de procura para a variação de cenários, foi possível realizar a microssimulação de tráfego e obter por meio dos indicadores de desempenho as vantagens e desvantagens associadas a cada estratégia.

No capítulo seguinte está apresentado o modelo de microssimulação construído no *software* Vissim com sua respectiva calibração e como foram obtidos os resultados.

4

MICROSSIMULAÇÃO

4.1. ENQUADRAMENTO

A avaliação do desempenho de cada estratégia e cada cenário de procura de veículos e peões, foi baseada na aplicação de um modelo com a utilização do *software* de microssimulação de tráfego multimodal PTV Vissim, juntamente com o *software* PTV Viswalk para a simulação de peões, o qual reproduz um comportamento do caminhar humano de forma realista e representativa.

Conforme Ortuzar e Willumsen (2011), um modelo é uma representação simplificada de parte da realidade, com foco em certos aspectos considerados relevantes para uma determinada análise ou ponto de vista.

4.2. ESTRUTURA DO MODELO

A representação do modelo construído que foi utilizado na generalidade das análises está apresentada na Figura 13.

4.2.1. PARÂMETROS DA SIMULAÇÃO

Foram definidos no início da construção do modelo cinco intervalos de tempo, sendo o primeiro de 5 minutos para o aquecimento da rede ou *warm-up*, por se tratar de uma rede pequena sem congestionamento. Os outros quatro intervalos subsequentes são de 15 minutos cada, correspondentes ao período de uma hora de simulação.

4.2.2. TRATAMENTO DOS MOVIMENTOS MOTORIZADOS

Por se tratar de um modelo genérico com intenção de refletir os centros urbanos brasileiros típicos, considerou-se que todas as vias de tráfego possuem uma largura de 3 metros, existindo duas vias na faixa de rodagem principal e duas vias na faixa de rodagem secundária.

A composição veicular na rede é composta somente por veículos ligeiros, para os quais foram mantidas as características pré-definidas do *software* para largura e comprimento, sendo de 1,85 a 2,07 metros e 3,75 a 4,76 metros, respectivamente. As funções de máxima aceleração, aceleração desejada, máxima desaceleração e desaceleração desejada foram igualmente mantidos conforme valores *default* para veículos ligeiros.

A distribuição da velocidade desejada, ou seja, a velocidade desejada pelo motorista que realizará sua viagem se não for impedido por outros veículos ou objetos na rede, como por exemplo sinais

luminosos, foi utilizada mediante a velocidade regulamentada nesse tipo de via em ambientes urbanos de 40 km/h.

Foram seleccionados dois locais para inserir os dados de entrada de veículos, um na via principal e outro na vida secundária. O mesmo fluxo foi utilizado ao longo da uma hora de análise após o período de *warm-up*. Os dados inseridos foram variados conforme os cenários de análise.

As rotas dos veículos permitem que as duas vias da faixa de rodagem principal e secundária possam ir em frente e a via mais à direita responda, de forma partilhada à viragem à direita da faixa principal, bem como a via mais à esquerda faça a viragem à esquerda da faixa secundária.

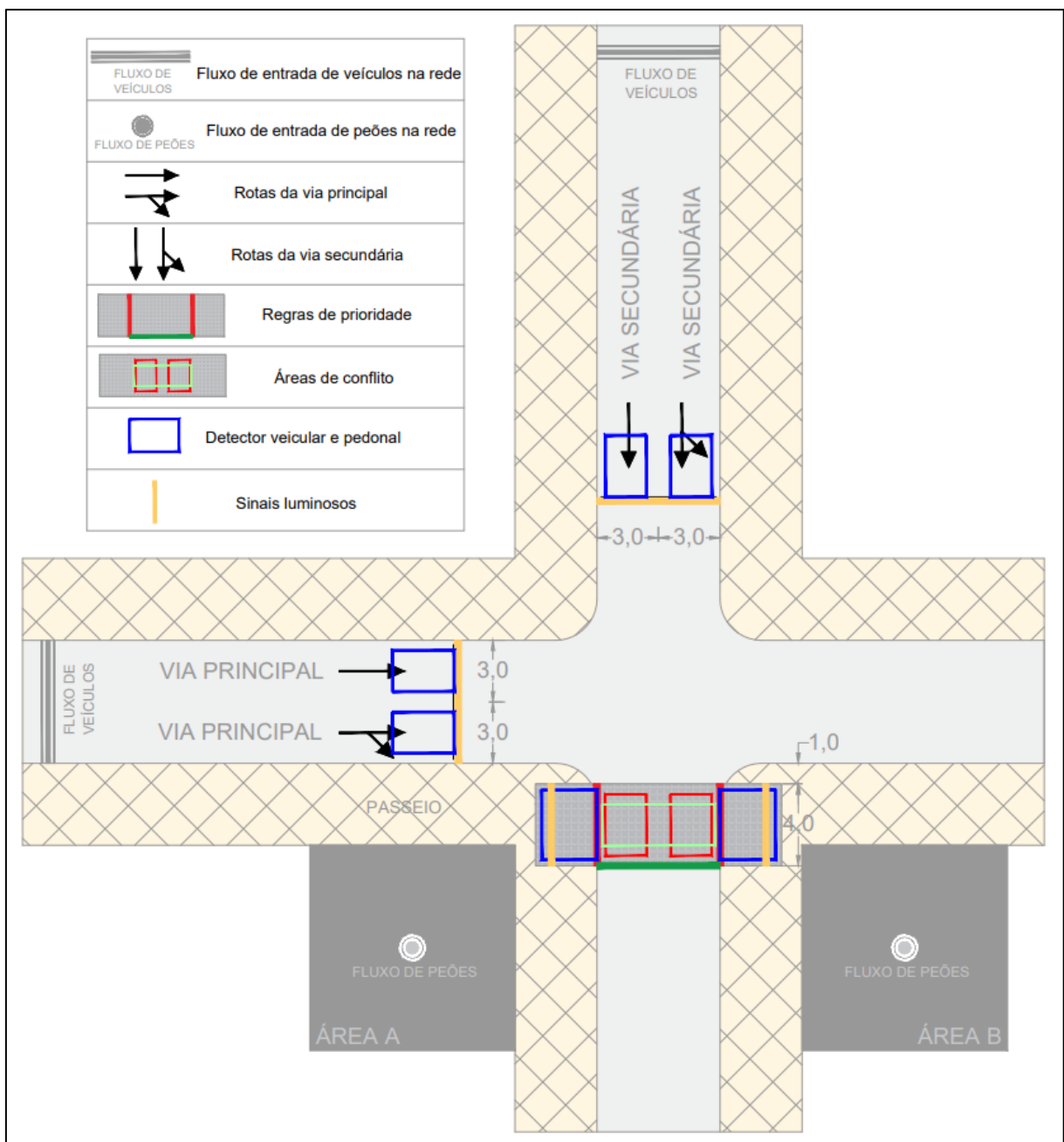


Fig. 13 – Representação do modelo construído no *software* Vissim

4.2.3. TRATAMENTO DOS MOVIMENTOS PEDONAIS

O Vissim permite que os peões sejam modelados de duas maneiras diferentes: por meio do modelo Wiedemann, onde os peões se movem unidirecionalmente em um *link* regido pelas mesmas regras e comportamento atribuídos aos carros; ou através do modelo de “Força Social”, que permite que os peões modelados se movam livremente em duas dimensões espaciais.

Conforme o PTV (2018), o modelo de Força Social fornece resultados mais realistas e, portanto, é o modelo recomendado para a representação de peões em meio urbano. Assim, modelaram-se os peões com o modelo de Força Social através da criação de duas áreas fora do passeio com o valor de entrada do fluxo de peões (o qual varia conforme os cenários de análise), das áreas representando o passeio dos peões e um *link* a conectar os passeios, o qual cruza a via dos veículos a representar assim a passadeira; esse *link* foi considerado como uma área de peões e, portanto, faz com que o deslocamento dos peões seja baseado nesse modelo. Esse *link* possui 4,0 m de largura e está afastado 1,0 m do alinhamento da pista transversal, conforme recomendações do Manual Brasileiro de Sinalização Horizontal (CONTRAN, 2007) para travessia de peões. Foram introduzidas duas rotas para os peões, uma que vai da área A que possui um valor de entrada do fluxo de peões até a área B, e vice-versa, conforme apresentado na Figura 14.

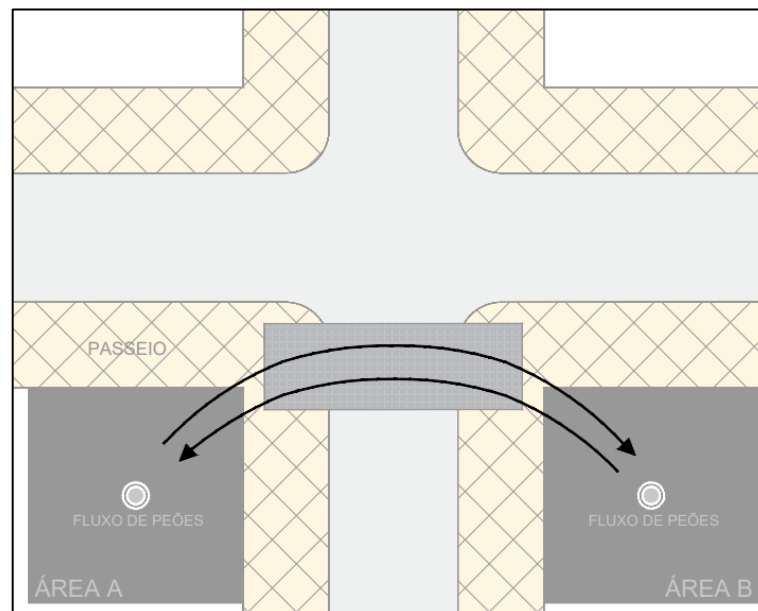


Fig. 14 – Representação da modelação dos peões no software Vissim

Existe uma grande dificuldade em estimar a proporção de peões desobedientes em situações reais e hipotéticas, uma vez que só os peões infratores, os quais efetivamente desrespeitam os sinais luminosos podem ser contabilizados. Já entre os peões oportunistas, existem aqueles que estão procurando por uma brecha e não a encontram, mas não deixam de ser oportunistas caso houvesse a brecha, não sendo assim possível contabilizar com precisão os peões oportunistas (Bandeira, 2019). Portanto, a fim de representar esse comportamento, optou-se por modelar que todos os peões são desobedientes face aos sinais luminosos se tiverem a oportunidade.

Para isso, foi criado um tipo de composição nomeada de “Pedestrian Disobey”, sendo essa composta por homens e mulheres desobedientes, com uma velocidade desejada relativa a pessoas entre 30 e 50 anos. Os homens e mulheres desobedientes foram criados por meio de cópias já existentes por *default* de homens e mulheres, tendo por único objetivo serem parte da composição criada.

4.2.4. REGULAÇÕES DOS SINAIS LUMINOSOS

Como apresentado no Capítulo 3, foram utilizadas três diferentes estratégias de regulação semafórica: tempos fixos, tempos atuados e tempos fixos com contagem regressiva.

Para a estratégia a tempos fixos, foi criado na lista de *Signal Controllers* um sinal luminoso do tipo *fixed time*, o qual possui 3 *signal groups*: 1 – Principal, 2 – Secundário e 3 – Peão. Para os *signal groups* 1 e 2, a sequência dos sinais é vermelho, verde e amarelo, com tempos mínimos de 1, 8 e 3 segundos respectivamente; enquanto para o *signal group* 3 a sequência é do sinal vermelho, verde e verde intermitente, com tempos mínimos de 1, 6 e 6 segundos respectivamente. Pode-se observar na Figura 15 a regulação do sinal luminoso no *software* Vissim utilizado para a estratégia de tempos fixos a três fases em um ciclo de 110 segundos.

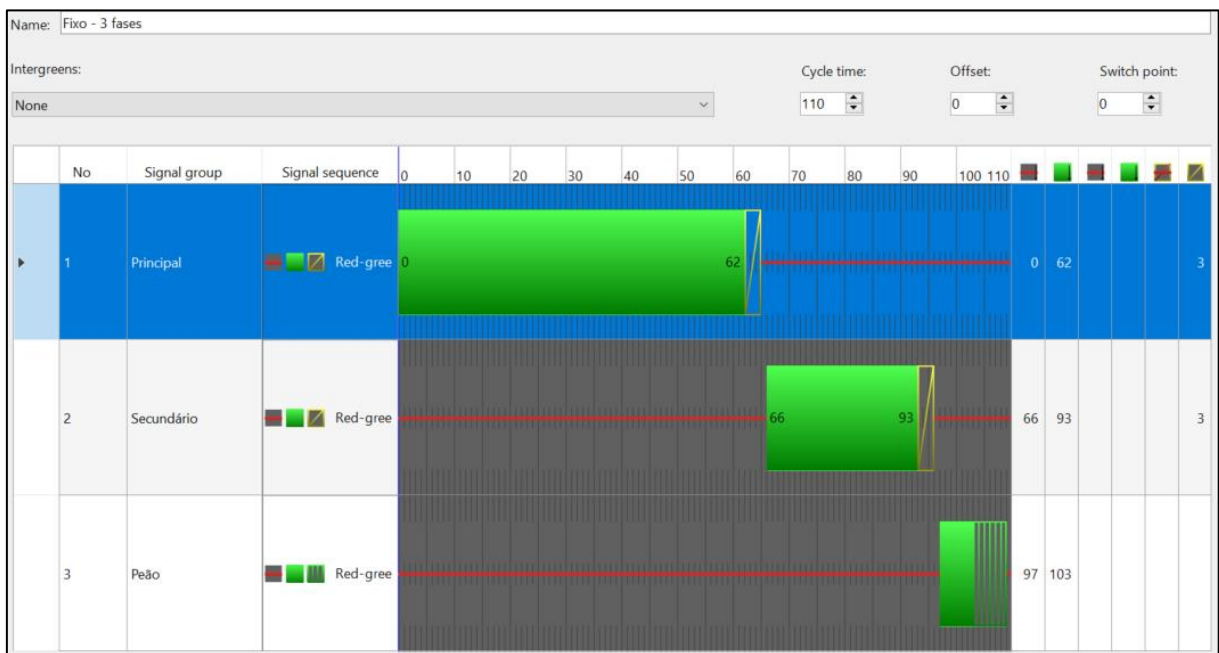


Fig. 15 – Plano de regulação semafórica base no *software* Vissim

Para a criação do plano de regulação semafórica atuado, foi necessário criar um arquivo com os dados semafóricos das transições entre fases (arquivo .pua) e um arquivo com a lógica de controle (arquivo .vap). Em conjunto, esses arquivos permitem criar um modelo VAP que interage diretamente com o Vissim e permite a criação de uma regulação semafórica atuada (Figura 16).

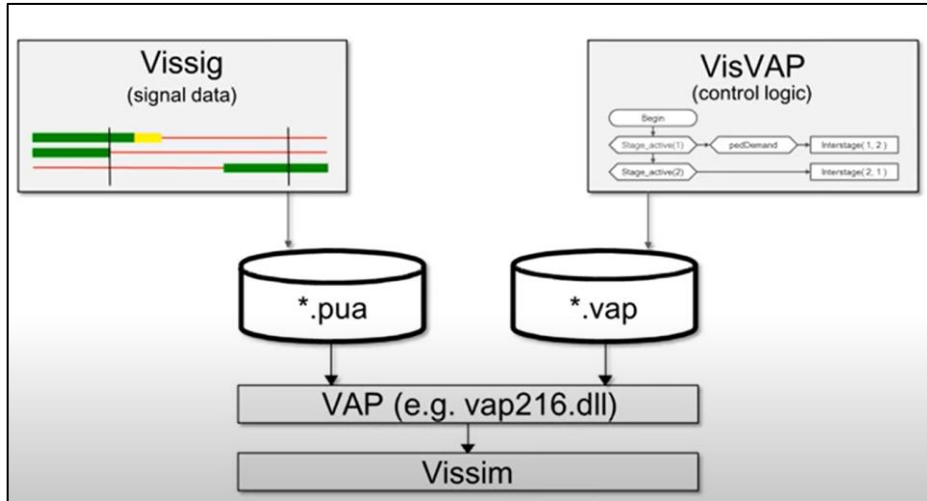


Fig. 16 – Forma de criação de plano de regulação semafórica atuada no *software* Vissim (PTV, 2017)

A lógica da regulação semafórica atuada foi construída por recurso ao módulo VisVAP e foi realizada conforme Figura 17.

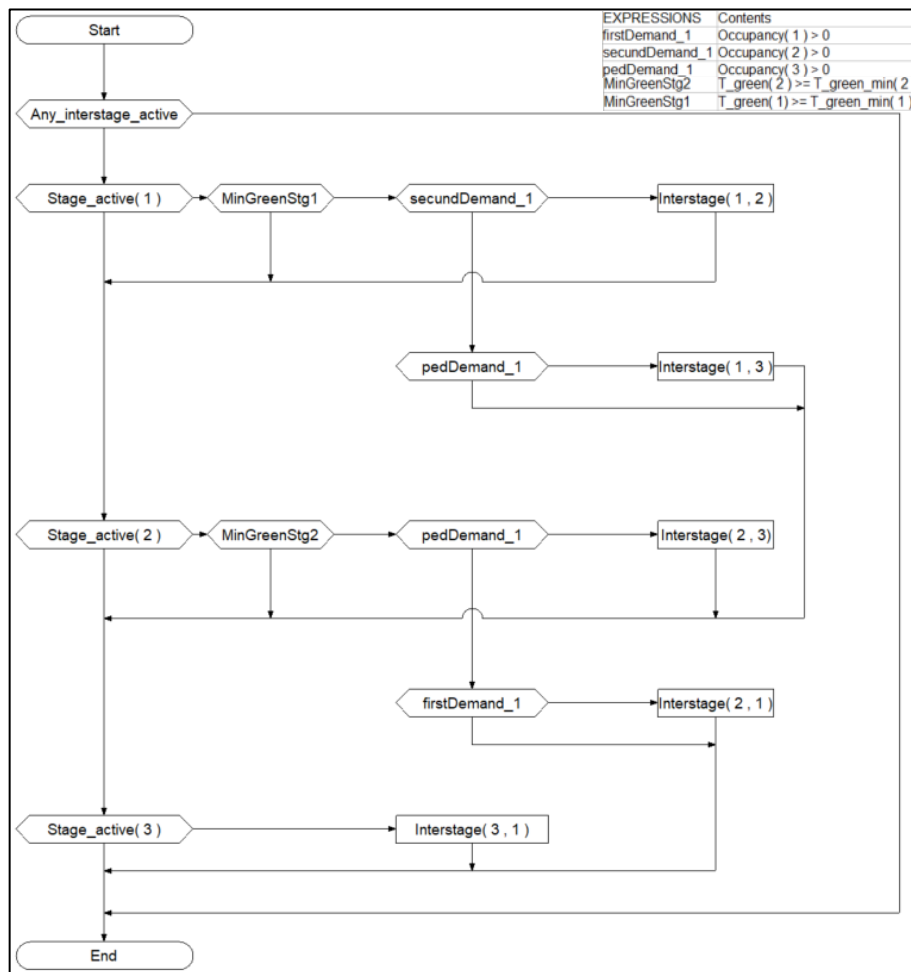


Fig. 17 – Lógica criada no módulo VisVAP para regulação semafórica atuada

Foi necessário introduzir na rede detectores de veículos na via principal e via secundária, os quais estão alocados aproximadamente a 3,0 metros da linha de paragem conforme recomenda Costa et. al (2008). Também foram colocados detectores para os peões nos dois sentidos do atravessamento, os quais se comportam como as botoeiras e avisam que há peões à espera para atravessar.

Ainda que existam os detectores para os peões para a ativação da fase, para modelar os peões com um comportamento oportunista, os peões não devem respeitar o sinal luminoso em questão, somente ativar o detetor. Para isso, quando foram colocados os respectivos sinais luminosos no *link* de atravessamento dos peões, optou-se por seleccionar que os homens e mulheres desobedientes não devem ser afetados pela regulação, assim, os peões desobedientes existentes na simulação irão ser detectados, mas não irão ser obedientes face aos sinais luminosos.

Por fim, para modelar o sinal luminoso a tempos fixos com contagem regressiva, foi alterado o comportamento do peão conforme trabalho de Xiong et al. (2014) e Matos (2020), onde se concluiu existir uma maior tendência de obediência aos sinais luminosos com contagem regressiva. A desobediência aos sinais luminosos na simulação no *software* Vissim foi realizada por meio do tempo mínimo de brecha disponível aos peões (*minimum gap time*). Ou seja, quando o peão tem esse tempo de brecha disponível, ele realiza o atravessamento ainda que a fase não esteja ativa. Portanto, para modelar o comportamento dos peões nos sistemas de contagem regressiva foram feitos três testes com diferentes valores de *minimum gap time* e quantificada a alteração na percentagem de desobediência. Observou-se que quanto maior esse tempo, maior a obediência dos peões, portanto, optou-se por uma alteração nesse valor de 8,5s (calculado no item 4.2.5) para os sinais luminosos a tempos fixos e atuados para um valor de 17,0s para os sinais luminosos a tempos fixos com contagem regressiva.

4.2.5. CONFLITOS ENTRE PEÕES E VEÍCULOS

Ao violar a indicação do sinal luminoso, os peões oportunistas estão sujeitos a interações com os outros meios de transportes. Esses conflitos podem ser modelados no Vissim utilizando a ferramenta *conflict area* ou a ferramenta *priority rules* (Friss; Svensson, 2013).

Para modelar a oportunidade criada aos peões, utilizou-se a ferramenta de regras de prioridade por envolver principalmente os atributos: *minimum clearance* (distância) e *minimum gap time* (tempo). O atributo *minimum clearance* representa a distância do *conflict marker* contra a direção do movimento até o primeiro veículo que está se movendo em direção ao *conflict marker*. Enquanto o atributo *minimum gap time* é o tempo que o primeiro veículo a montante exigirá para alcançar o *conflict marker* com a sua velocidade atual (Figura 18).

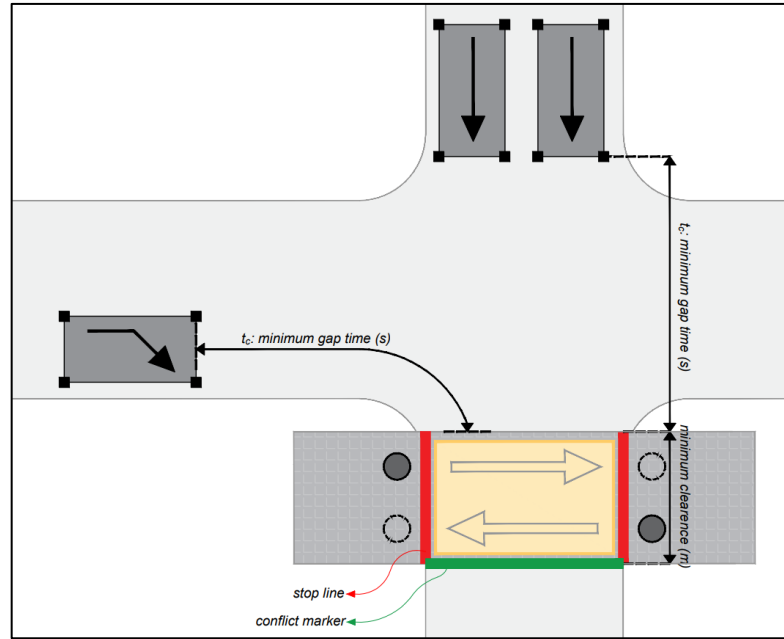


Fig. 18 – Representação da colocação da ferramenta *priority rules*

O *minimum gap time* foi estimado baseado no método do HCM (2016) para cruzamentos não sinalizados. Se o intervalo disponível for maior do que o intervalo crítico, presume-se que o peão cruzará, mas se o intervalo disponível for menor que o intervalo crítico, presume-se que o peão não cruzará. Segue na Equação 8 o cálculo do *minimum gap time*:

$$t_c = \frac{L}{S_p} + t_s \quad (8)$$

Onde:

t_c = *minimum gap time* para um único peão (s);

L = largura do atravessamento (m);

S_p = velocidade média de caminhada (m/s);

t_s = tempo inicial e final de limpeza (s).

O manual sugere como valores padrão para a população em geral uma velocidade média de caminhada de 3,5pés/s (1,1m/s) e um tempo inicial e final de limpeza de 3 segundos, portanto:

$$t_c = \frac{6}{1,1} + 3 = 8,5s$$

O valor do *minimum clearance* utilizado foi de 4 metros, a fim de que nenhum peão inicie o atravessamento enquanto um veículo estiver dentro da área conflituante dos peões e veículos.

Ainda que tenham sido elaboradas as *priority rules*, a fim de que nenhum veículo passe por cima de um peão, caso o seu julgamento do *minimum gap time* não seja o suficiente para realizar o atravessamento, foi ainda determinado pela ferramenta *conflict area* que o peão tem preferência em função do veículo, assim, caso o peão comece a travessia de forma desobediente, o veículo irá aguardar até que essa seja finalizada.

Para fins de modelação e permissão de desobediência ao sinal luminoso, como já salientado anteriormente, os peões desobedientes carregados na rede não serão afetados pela regulação semafórica, no entanto, optou-se por selecionar que esses peões devem respeitar as *priority rules* existentes. Dessa forma, homens e mulheres desobedientes não irão respeitar o sinal luminoso, porém irão observar o *minimum gap time* para realizar o atravessamento.

Para a estratégia a tempos fixos com contagem regressiva foi alterado o valor do *minimum gap time* para 17,0s, valor que, por meio de teste com três diferentes valores de *minimum gap time*, demonstrou uma maior obediência dos peões.

4.3. CALIBRAÇÃO

Essa etapa consiste na calibração dos parâmetros, os quais são ajustados para minimizar as diferenças entre os valores simulados e os valores obtidos em campo. Por se tratar de um modelo representando um cruzamento fictício, a maioria de seus parâmetros foram atribuídos por valores *default*. No entanto, visto o modelo ter sido inspirado em um cruzamento real, alguns parâmetros foram alterados para representar a realidade de forma mais aproximada.

4.3.1. MOVIMENTOS MOTORIZADOS

Conforme o PTV (2018), “*os veículos estão se movendo na rede usando um modelo de fluxo de tráfego. A qualidade do modelo de fluxo de tráfego é essencial para a qualidade da simulação.*”

O modelo de fluxo de tráfego do Vissim é um modelo microscópico estocástico, baseado em intervalos de tempo, que trata as unidades motorista-veículo como entidades básicas. O modelo de fluxo de tráfego contém um modelo de percepção psicofísica de *car following* desenvolvida por Wiedmann em 1974.

O comportamento do modelo *car following* é baseado em quatro estados diferentes de direção, que são: direção livre, onde nenhuma influência de outros veículos pode ser observada; aproximação, onde o motorista adapta sua velocidade em função dos veículos a sua frente; seguindo, onde o motorista segue outro carro sem alterar sua própria velocidade; e frenagem, onde o motorista precisa frear devido à distância do veículo a frente cair abaixo da distância de segurança desejada.

Utilizou-se no *driving behavior* o modelo de comportamento *car following Wiedemann 74*, visto que o Manual do Usuário (PTV, 2018) sugere seu uso para tráfego urbano, enquanto o modelo *Wiedemann 99* é sugerido para rodovias.

O conjunto de parâmetros do *driving behavior* são: *following* e *car following model* de acordo com o Wiedemann 74, *lane change*, *lateral*, *signal control*, *autonomous driving*, *driver errors* e *meso*.

Os parâmetros em sua maioria foram mantidos com o valor *default* visto que sua alteração levaria a mudanças consideráveis nos resultados da simulação, sendo necessário fazer uma análise de sensibilidade a fim de que as mudanças sejam coerentes com o modelo.

No conjunto de parâmetros do *following* foram alterados somente o valor do *look ahead distance minimum* e do *look back distance minimum* para 30 m, por se tratar da distância mínima que um veículo consegue ver a frente e atrás para reagir a outros veículos, sendo importante em áreas urbanas que esse valor seja maior que 0 e esteja entre 20 e 30 metros, conforme o PTV (2018).

Já os parâmetros do *car following model* não tiveram nenhuma alteração, sendo eles apresentados no Quadro 13.

Quadro 13 – Parâmetros utilizados no modelo *car following* do *Wiedaman 74*

PARÂMETRO	SIGNIFICADO	VALOR DEFAULT
ax	Espaçamento entre os veículos parados.	2,0 m
bx_add	Parte aditiva da distância de segurança.	2,0
bx_muly	Parte multiplicativa da distância de segurança.	3,0

No conjunto de parâmetros do *lane change*, alterou-se o valor do *maximum deceleration for cooperative braking* do valor *default* de -3m/s^2 para -5m/s^2 , a fim de que o veículo que se encontra atrás tenha uma frenagem maior e mais cooperativa, de modo a permitir que um veículo precedente tenha maior probabilidade de mudar de via. A alteração desse parâmetro foi necessária, visto que os veículos que precisavam fazer a viragem não estavam encontrando brechas para efectuar a manobra. No final da simulação, alguns veículos eram removidos da rede por terem alcançado o *diffusion time* antes de conseguirem realizar a viragem. Com essa alteração, isso cessou.

Visto que o restante dos parâmetros do *lane change* ficaram com valores *default*, segue na Figura 19 os parâmetros utilizados.

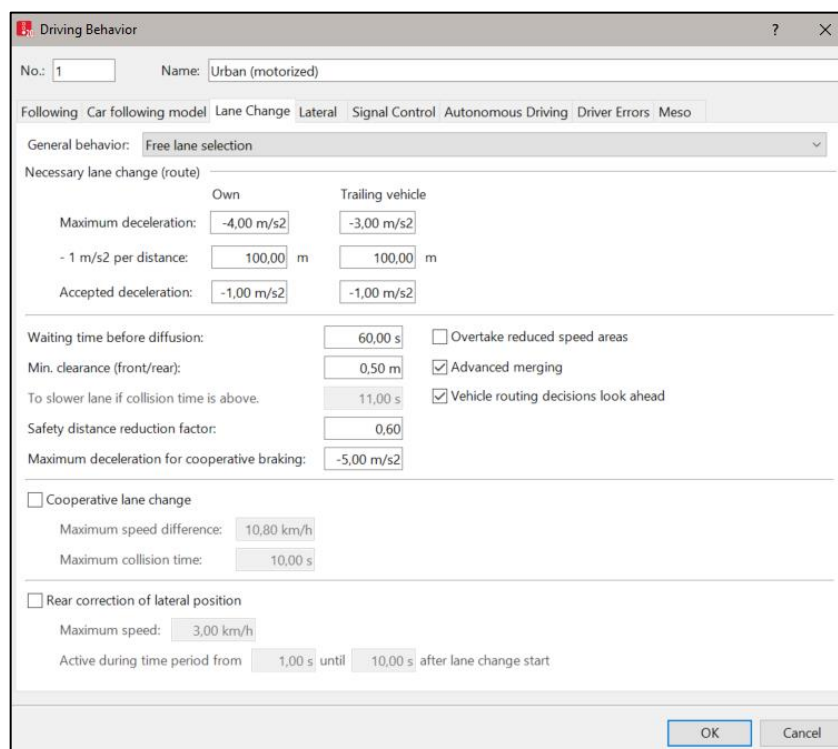


Fig. 19 – Parâmetros utilizados na calibração do *lane change*

O conjunto de parâmetros do comportamento do *lateral, signal control, autonomous driving, driver errors* e *meso* não foram alterados, tendo sido utilizado os valores *default*.

4.3.2. MOVIMENTOS PEDONAIS

Os parâmetros de calibração do modelo de Força Social podem ser ajustados na etapa de definição do *walking behavior*. Para cada tipo de peão, é selecionado o tipo de comportamento de caminhada que se deseja ter. Os valores *default* dos parâmetros do *walking behavior*, juntamente com o significado de cada um, estão apresentados no Quadro 14.

Quadro 14 – Parâmetros para calibração dos peões

PARÂMETRO	SIGNIFICADO	VALOR DEFAULT
Tau	Fator associado ao tempo de reação dos peões para que eles saiam de sua velocidade atual e cheguem na velocidade desejada. Valores mais altos resultam em acelerações mais altas.	0,4 s
ReactToN	Determina o número máximo de peões que são levados para consideração ao calcular a força social, F_{social} .	8
ASocIso	Esses dois parâmetros governam a força dependente da direção entre os peões. A variável $A_{soc_isotropic}$ é uma constante que representa a magnitude admissível da força, e a variável $B_{soc_isotropic}$ é uma constante que representa o raio de alcance da força, nesse caso, tem uma correspondência com o raio do corpo do peão	2,72
BSocISo		0,2
Lambda	Representa a anisotropia associada à influência do campo de visão do peão sobre as forças sociais, podendo atingir valores de 0 a 1. Pretende levar em consideração que as pessoas e eventos atrás de um peão não influenciam seu movimento tanto quanto as pessoas e eventos à frente.	0,176
ASocMean	Rege a força da força social entre dois peões	0,4
BSocMean	Rege o alcance da força social entre dois peões	2,8
VD	Leva em consideração as velocidades relativas dos peões e contribui para a força social, F_{social} . Ao aumentar o VD, os peões adversários evitam mais cedo ao passar ou se encontrar.	3
Noise	Determina a força do termo de força aleatória, F_{noise} . O termo de força aleatória é adicionado à força após todas as outras forças terem sido calculadas apenas se um peão for mais lento do que sua velocidade desejada por um determinado tempo.	1,2
Side preference	Determina as preferências laterais dos peões, se eles preferem passando um pelo outro para a esquerda ou para a direita	<i>Random</i> (aleatório)

Devido à falta de experiência e sensibilidade com os parâmetros, nenhum deles foi alterado, a utilizar todos os valores *default*.

4.4. SIMULAÇÃO E RESULTADOS

4.4.1. PARÂMETROS DA SIMULAÇÃO E DOS RESULTADOS

Definiu-se como o período de simulação o total de 3900 segundos, que representam 5 minutos de *warm-up* (300s) e 60 minutos de análise (3600s). Optou-se por obter os resultados no intervalo de uma hora, a partir dos 5 minutos após o *warm-up*.

É possível definir a quantidade de atualizações da simulação (*time step*) por segundo, esse dado pode variar de 1 a 20, onde 1 é a simulação mais imprecisa e mais rápida e 20 a mais lenta, porém com maior precisão. Devido ao alto número de simulações que foram realizadas, reduziu-se o valor *default* de 10 para um valor de 2 *time step* por segundo.

De forma a não haver a generalização dos resultados a partir de uma só simulação, utilizou-se no parâmetro *number of runs* o valor de 10, tendo assim 10 replicações para cada cenário de tráfego simulado. O Manual do Usuário (PTV, 2018) aponta que esse número pode variar entre 5 e 20, dependendo do caso. Ainda, o estudo de Fries, Qi e Leight (2017) destaca que embora alguns estudos apontem o mínimo de 5 replicações, a maioria dos estudos e manuais indicam fazer 10 replicações.

4.4.2. PROCESSO DE OBTENÇÃO DOS RESULTADOS

Para a obtenção dos resultados dos veículos, foi criado um nó na região do cruzamento, onde obteve-se o comprimento médio da fila, atraso médio e número de paradas por veículo. O comprimento médio da fila foi obtido em metros para cada uma das aproximações. O atraso foi obtido em segundos e tem um valor distinto para cada movimento, ou seja, dois valores distintos para a via principal e dois valores distintos para a via secundária. Por fim, o número de paradas por veículo é um valor sem unidade obtido para cada movimento, assim como o atraso.

Para a obtenção dos resultados dos peões, foi feita uma seção para análise dos resultados no local da travessia e outras duas seções nos dois pontos de espera da travessia, visto que a densidade e, conseqüentemente, a avaliação do Nível de Serviço varia quando se trata de uma área de atravessamento ou uma área de espera. Sendo assim, obteve-se três diferentes densidades médias, em peões/m².

Ainda, o atraso médio por peão é obtido por meio dos dados de saída das seções, porém somente das duas seções de ponto de espera da travessia. Sendo assim, obteve-se dois diferentes tempos de atraso, em segundos.

A Figura 20 apresenta uma ilustração do *software* Vissim do nó criado na região do cruzamento o qual possibilita a obtenção de dados veiculares representado na cor vermelha, bem como as seções criadas para a obtenção dos resultados dos movimentos pedonais na cor azul.

Para obter a percentagem de peões desobedientes, utilizaram-se os dados de saída de informações sobre os peões e sobre os sinais luminosos, a fim de obter o momento exato em que os peões entram no local da travessia e se esse momento representa a fase vermelha ou não. Para isso, teve-se que fazer uma sobreposição do segundo da simulação que cada um dos peões acessam a área representada pelo número 1 na Figura 20 com a respectiva informação se esse segundo está ou não na fase permitida do atravessamento. Para fins de exemplo, segue abaixo na Figura 21 parte dos dados de saída dos peões, onde mostra cada um dos peões (PedNo) e o momento em segundos da simulação (tEnter) que esse peão entrou na travessia representada pelo número 1 (MeasurementAreNo). Sobrepondo o dado do tEnter com os sinais luminosos, obteve-se o número de peões que realizam a travessia em vermelho em função do número de peões totais na simulação.

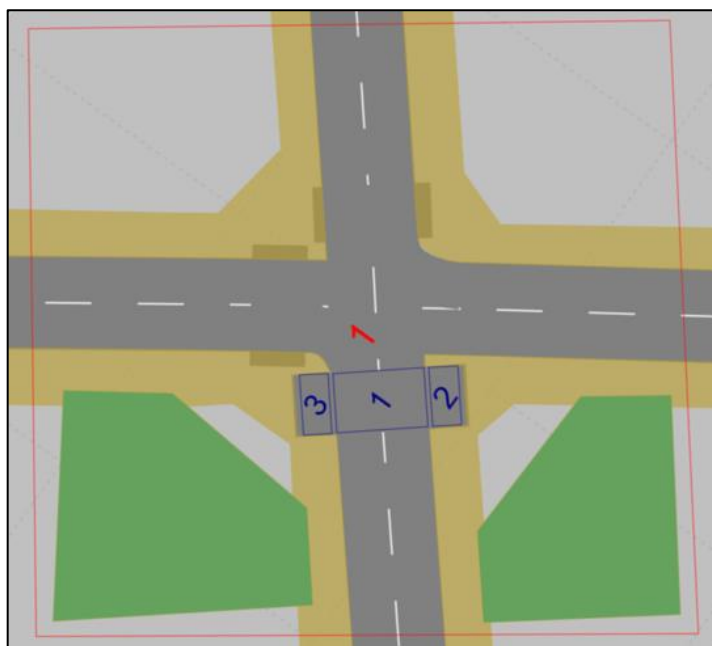


Fig. 20 – Criação de nó e seções para obtenção dos resultados

MeasurementAreaNo;	tEnter;	tLeave;	PedNo;
;	;	;	;
1;	296,5;	300,5;	38;
2;	300,5;	301,0;	38;
1;	296,5;	301,0;	42;
1;	296,5;	302,5;	37;
3;	301,5;	302,5;	42;
2;	303,0;	303,5;	37;
1;	296,5;	303,5;	40;
1;	298,0;	304,5;	41;
3;	303,5;	305,5;	40;
2;	305,0;	305,5;	41;
1;	299,0;	307,0;	39;
2;	307,5;	308,0;	39;
3;	311,0;	328,5;	43;
2;	314,0;	328,5;	44;
3;	322,5;	329,5;	45;
1;	329,0;	333,0;	43;
1;	329,0;	333,0;	44;

Fig. 21 – Exemplo de dados de saída para obtenção da percentagem de peões desobedientes

Salienta-se que ao fim das 10 replicações o software disponibiliza o valor médio dos parâmetros analisados, com exceção da percentagem de peões desobedientes. Visto que a obtenção da percentagem dos peões desobediente é feita manualmente com os resultados obtidos e por ser um trabalho demasiado longo, utilizou-se somente uma replicação.

5

RESULTADOS E ANÁLISES

5.1. ENQUADRAMENTO

Este capítulo centra-se na apresentação e análise dos resultados dos seis indicadores de desempenho, apresentados no capítulo 3.5, resultantes das simulações no *software* Vissim, aplicadas às diferentes regulações dos sinais luminosos nos 27 cenários estudados.

Os indicadores de desempenho analisados para os movimentos motorizados foram:

- Comprimento médio da fila na via principal (m);
- Comprimento médio da fila na via secundária (m);
- Atraso médio no movimento veicular em frente da via principal (s);
- Atraso médio no movimento veicular de viragem à direita da via principal (s);
- Atraso médio no movimento veicular em frente da via secundária (s);
- Atraso médio no movimento veicular de viragem à esquerda da via secundária (s);
- Número de paradas no movimento veicular em frente da via principal (por veículo);
- Número de paradas no movimento veicular de viragem à direita da via principal (por veículo);
- Número de paradas no movimento veicular em frente da via secundária (por veículo);
- Número de paradas no movimento veicular de viragem à esquerda da via secundária (por veículo).

Os indicadores de desempenho analisados para os movimentos pedonais foram:

- Densidade média na travessia (peão/m²);
- Densidade média na área de espera 1 (peão/m²);
- Densidade média na área de espera 2 (peão/m²);
- Atraso médio na área de espera 1 (s);
- Atraso médio na área de espera 2 (s);
- Percentagem de peões desobedientes (%).

5.2. INDICADORES DE MOVIMENTOS MOTORIZADOS

5.2.1. COMPRIMENTO MÉDIO DA FILA

Nas taxas de saturação de 30% e 60%, o sinal luminoso a tempos atuados apresentou resultados melhores de comprimento de fila médio tanto na via principal (Figura 22 e Figura 23) como na secundária (Figura 25 e Figura 26) quando o débito pedonal é de 100 peões/h/sentido em comparação com o restante das regulações semaforicas. Quando o número de peões aumenta para 300 e 500 peões/h/sentido e se mantém a taxa de saturação de 30% e 60%, obtém-se outro comportamento,

resultando num aumento significativo do comprimento de fila das vias principal e secundária. Isso ocorre visto que o aumento do volume de peões na rede em uma estratégia atuada com ciclo menor do que a estratégia a tempos fixos, faz com que a fase pedonal seja ativada com mais frequência ao longo intervalo do intervalo de tempo de análise, gerando no fim menos tempo de verde para as fases veiculares. Ainda, caso haja detecção de peões e não de veículos na via secundária, a fase secundária não entra em atuação, aumentando ainda mais o comprimento das filas.

Na taxa de saturação de 90%, independente do débito pedonal, o sinal luminoso a tempos atuados tem valores de desempenho piores quanto ao comprimento da fila média na via principal (Figura 24). Na via secundária, no entanto, esse valor é semelhante às outras regulações (Figura 27).

A regulação a tempos fixos sem e com contagem regressiva apresentam valores de comprimento médio de fila semelhante nos diferentes cenários, com exceção da via secundária com 60% de taxa de saturação (Figura 5), onde a regulação com contagem regressiva apresenta um valor significativamente pior.

No geral, para a via principal, a estratégia a tempos fixos com contagem regressiva apresentou bons resultados em relação ao comprimento médio de fila. Não foi a melhor estratégia em todos os cenários, visto que a estratégia a tempos atuados foi melhor nas taxas de saturação de 30% e 60% com 100 peões/h/sentido, porém, nesses cenários o comprimento médio da fila da estratégia com contagem regressiva foi somente 2,67m maior que a estratégia a tempos atuados.

Em relação a via secundária, quando a taxa de saturação é de 30%, a melhor estratégia em todos os cenários é a de tempos atuados. No entanto, quando essa taxa é alterada para 60% e 90%, tal como seria expectável, essa eficácia vai diminuindo, atingindo valores semelhantes para taxas de saturação de 90%, ou seja, próximas da saturação. Estes resultados respondem ao esperado, a mostrar que a estratégia associada aos tempos atuados tende a revelar-se mais eficaz perante cenários de baixa procura, em resultado do ajuste do tempo de verde à procura real, a tender para o estabelecimento dos tempos máximos, à medida que o cenário de procura se aproxima da saturação.

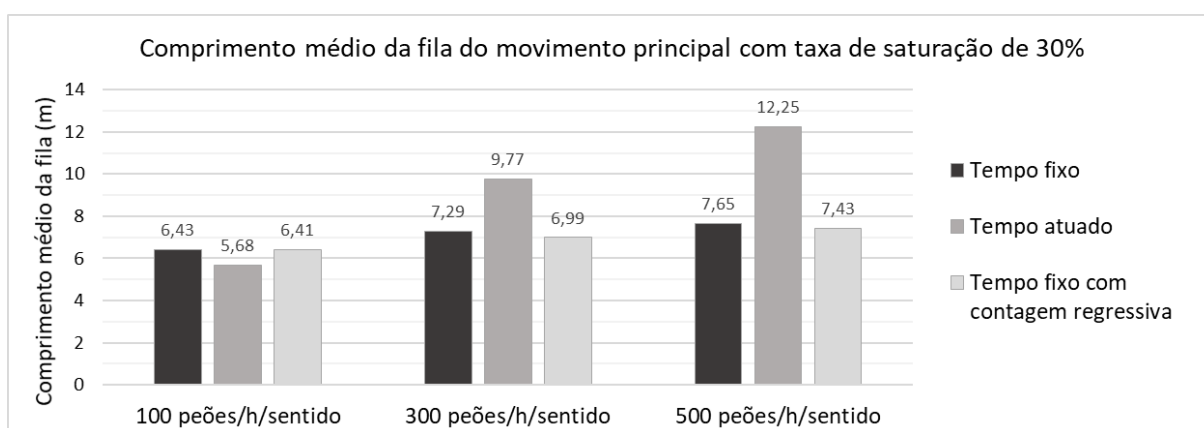


Fig. 22 – Comprimento médio da fila do movimento principal com taxa de saturação de 30%

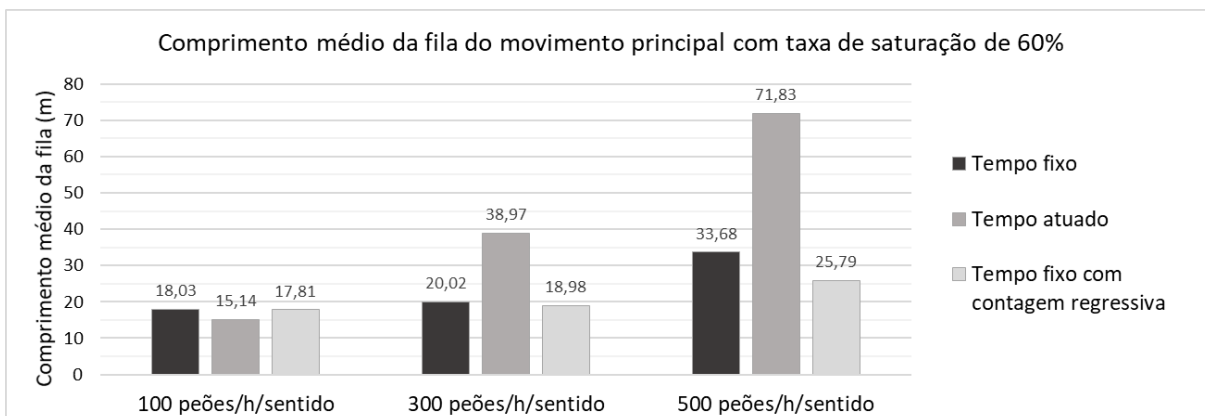


Fig. 23 – Comprimento médio da fila do movimento principal com taxa de saturação de 60%

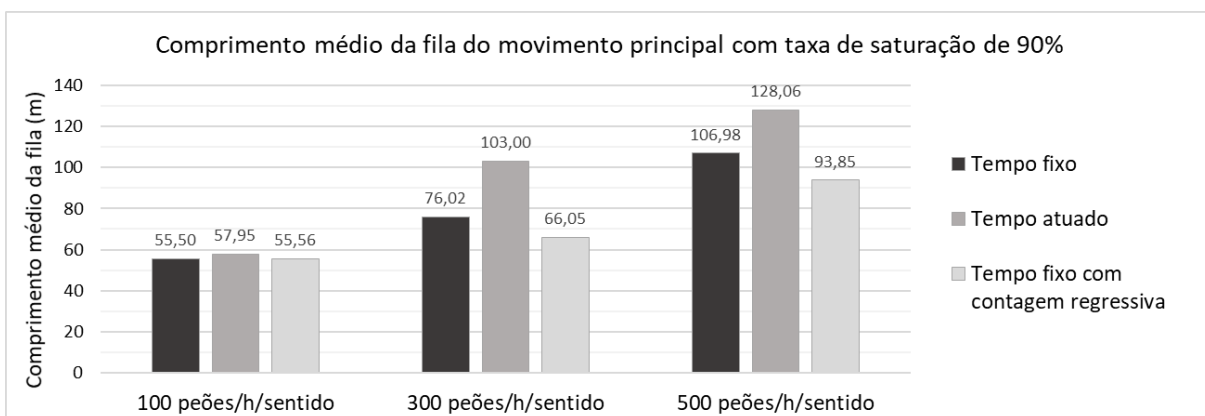


Fig. 24 – Comprimento médio da fila do movimento principal com taxa de saturação de 90%

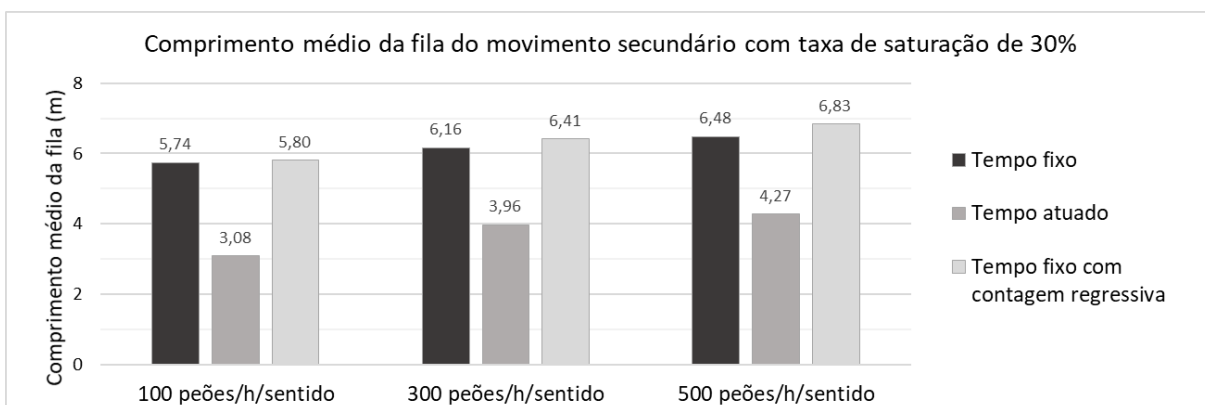


Fig. 25 – Comprimento médio da fila do movimento secundário com taxa de saturação de 30%

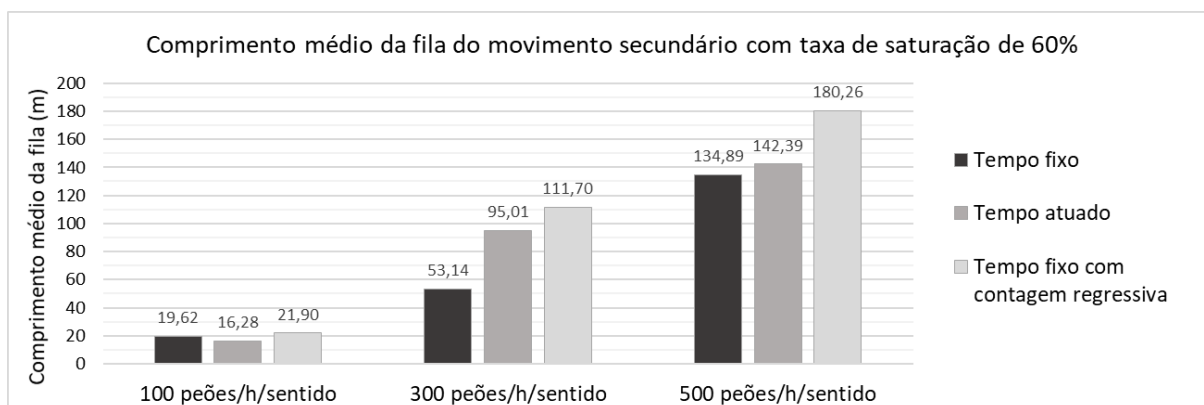


Fig. 26 – Comprimento médio da fila do movimento secundário com taxa de saturação de 60%

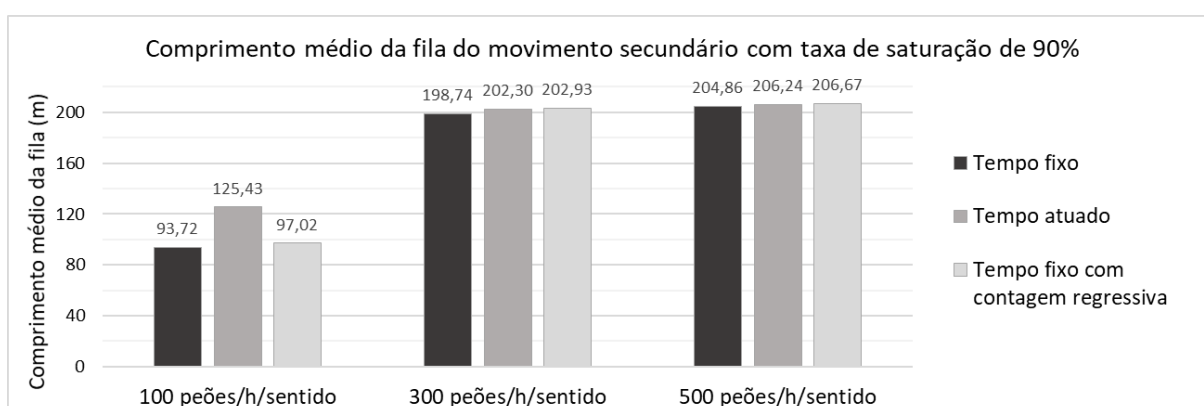


Fig. 27 – Comprimento médio da fila do movimento secundário com taxa de saturação de 90%

5.2.2. ATRASO VEICULAR

Com os resultados do atraso médio veicular dos movimentos da via principal (Quadro 15 e Quadro 16) e secundária (Quadro 17 e Quadro 18), percebe-se que quando o fluxo de peões é de 100 peões/h/sentido, nas diferentes taxas de saturação, a estratégia a tempos atuados apresenta bom desempenho. Porém, quando o fluxo pedonal aumenta para 300 e 500 peões/h/sentido, o desempenho associado a esta estratégia diminui.

Visto que o tempo para a travessia pedonal não é alterado com o débito pedonal, entende-se que mais peões necessitam realizar a travessia no mesmo intervalo de tempo disponível. Conforme citado no estudo de Golakiya e Dhamaniya (2019), interrupções forçadas no fluxo veicular por peões que realizam a travessia em momentos oportunos, podem gerar incremento no atraso dos veículos, que é justamente o obtido nos resultados.

Quando comparadas as estratégias de tempos fixos sem e com contagem regressiva, ainda que o parâmetro alterado seja no comportamento dos peões, nota-se que houve alterações nos atrasos dos veículos. Nos movimentos da via principal, a regulação a tempos fixos com contagem regressiva demonstra melhores resultados, enquanto na via secundária é a estratégia a tempos fixos sem contagem regressiva que se destaca pelo bom desempenho.

Conforme o HCM (2016), atrasos veiculares acima de 80 s/veíc passam a ser irrelevantes para a análise entre as diferentes regulações semaforicas, pois já se encontram com Níveis de Serviço em F e

consequentemente com a via saturada. Ainda que se idealizou os cenários com taxas de saturação sem que a capacidade da via fosse excedida (30%, 60% e 90%), vale destacar que a capacidade considerada foi determinada sem qualquer procura de peões na rede, portanto, quando se adiciona peões na simulação, mesmo a taxa de saturação não chegando a 100%, ocorre uma saturação veicular na rede.

Simulou-se, a caráter de teste, o cenário com a estratégia a tempos atuados com 90% de taxa de saturação, visto que foi a que apresentou maiores valores de atraso veicular, porém com o débito pedonal em zero, a fim de perceber se os peões são os responsáveis pelo aumento do atraso veicular. Obteve-se como resultado valores de atraso máximo de 28,38 s/veíc para o movimento de viragem à esquerda da via secundária. Portanto, conclui-se que caso não houvesse o comportamento desobediente por parte dos peões, não haveria também qualquer interrupção do fluxo veicular próximo aos locais de travessia durante a fase verde dos veículos. Neste caso, a taxa de saturação de 90% iria atender a demanda de veículos na sua totalidade.

Quadro 15 – Atraso médio veicular do movimento em frente da via principal

ATRASO MÉDIO DO MOVIMENTO EM FRENTE DA VIA PRINCIPAL (s/veíc)									
Taxa de saturação	30%			60%			90%		
Peões/h/sentido	100	300	500	100	300	500	100	300	500
Tempo fixo	10,40	10,85	11,05	13,34	14,18	19,68	20,65	22,91	40,15
Tempo atuado	9,19	14,12	16,57	11,45	23,75	42,53	20,64	35,50	51,24
Tempo fixo com contagem regressiva	10,39	10,72	10,86	13,20	13,68	16,62	20,65	22,83	34,01

Quadro 16 – Atraso médio veicular do movimento de viragem à direita da via principal

ATRASO MÉDIO DO MOVIMENTO DE VIRAGEM À DIREITA DA VIA PRINCIPAL (s/veíc)									
Taxa de saturação	30%			60%			90%		
Peões/h/sentido	100	300	500	100	300	500	100	300	500
Tempo fixo	12,17	15,56	18,27	15,20	17,99	29,07	22,01	29,51	45,21
Tempo atuado	11,45	21,13	28,09	13,96	32,13	59,40	23,02	38,98	59,78
Tempo fixo com contagem regressiva	12,02	14,40	17,38	15,00	16,76	24,29	21,85	25,97	37,63

Quadro 17 – Atraso médio veicular do movimento em frente da via secundária

ATRASO MÉDIO DO MOVIMENTO EM FRENTE DA VIA SECUNDÁRIA (s/veíc)									
Taxa de saturação	30%			60%			90%		
Peões/h/sentido	100	300	500	100	300	500	100	300	500
Tempo fixo	20,05	24,00	27,87	32,97	87,99	180,68	78,06	181,00	242,02
Tempo atuado	11,80	16,74	19,80	27,50	130,52	193,53	99,79	198,27	239,38
Tempo fixo com contagem regressiva	20,59	25,38	30,57	36,64	152,61	244,51	81,10	207,13	276,07

Quadro 18 – Atraso médio veicular do movimento de viragem à esquerda da via secundária

ATRASO MÉDIO DO MOVIMENTO DE VIRAGEM À ESQUERDA DA VIA SECUNDÁRIA (s/veíc)									
Taxa de saturação	30%			60%			90%		
Peões/h/sentido	100	300	500	100	300	500	100	300	500
Tempo fixo	20,45	21,40	22,42	33,73	78,24	149,61	76,91	169,97	220,18
Tempo atuado	11,15	13,85	15,28	29,53	113,93	162,79	97,03	174,57	202,34
Tempo fixo com contagem regressiva	20,55	22,12	23,28	37,50	128,87	194,89	79,26	192,73	245,10

5.2.3. NÚMERO DE PARADAS

O semáforo atuado, por ter ciclos menores, acaba por gerar maior número de paradas na via principal, tanto no movimento em frente (Quadro 19), como no movimento de viragem à direita (Quadro 20). Por sua vez, as estratégias a tempos fixos, as quais estão associadas a um ciclo maior resultam consequentemente num menor número de paradas.

Esse comportamento não é o mesmo na via secundária quando a taxa de saturação é de 30%, sendo que o número de paradas é menor no controlo atuado, tanto no movimento em frente (Quadro 21) quanto no movimento de viragem à esquerda (Quadro 22). Já nas taxas de saturação de 60% e 90%, da mesma forma que na via principal, a estratégia a tempos atuados apresenta pior desempenho, ou seja, maior número de paradas.

Quando se comparam as duas estratégias de tempos fixos, nota-se que na via principal a estratégia com contagem regressiva tem uma pequena vantagem quanto a estratégia sem contagem regressiva. Porém, de forma contrária na via secundária, a estratégia a tempos fixos sem a contagem regressiva é a que apresenta os melhores resultados.

Portanto, a melhor estratégia a ser utilizada quando busca-se diminuir o número de paradas por veículo varia entre a estratégia a tempos fixos com contagem regressiva para a via principal e a estratégia a tempos fixos sem contagem regressiva para via secundária. Ainda, é de salientar que a estratégia a tempos atuados é a que tem piores desempenhos no número de paradas na perspectiva do condutor em 70% dos cenários analisados.

Os padrões de evolução dos resultados desse indicador apresentaram comportamentos esperados, com o aumento do número de paradas por veículos mediante o aumento do débito pedonal em cada taxa de saturação analisada, visto que com mais peões a desobedecer aos sinais luminosos na rede ocorrem mais interrupções do fluxo veicular.

Quadro 19 – Número de paradas por veículo do movimento em frente da via principal

Nº DE PARADAS POR VEÍCULO DO MOVIMENTO EM FRENTE DA VIA PRINCIPAL									
Taxa de saturação	30%			60%			90%		
Peões/h/sentido	100	300	500	100	300	500	100	300	500
Tempo fixo	0,53	0,59	0,57	0,58	0,63	0,84	0,65	0,84	1,23
Tempo atuado	0,57	0,77	0,87	0,63	1,13	1,93	0,82	1,25	1,85
Tempo fixo com contagem regressiva	0,53	0,55	0,56	0,58	0,60	0,72	0,65	0,75	1,01

Quadro 20 – Número de paradas por veículo do movimento de viragem à direita da via principal

Nº DE PARADAS POR VEÍCULO DO MOVIMENTO DE VIRAGEM À DIREITA DA VIA PRINCIPAL									
Taxa de saturação	30%			60%			90%		
Peões/h/sentido	100	300	500	100	300	500	100	300	500
Tempo fixo	0,62	0,80	0,97	0,67	0,82	1,34	0,70	0,95	1,47
Tempo atuado	0,69	1,17	1,56	0,76	1,59	2,90	0,93	1,39	2,29
Tempo fixo com contagem regressiva	0,60	0,72	0,92	0,65	0,75	1,08	0,67	0,84	1,17

Quadro 21 – Número de paradas por veículo do movimento em frente da via secundária

Nº DE PARADAS POR VEÍCULO DO MOVIMENTO EM FRENTE DA VIA SECUNDÁRIA									
Taxa de saturação	30%			60%			90%		
Peões/h/sentido	100	300	500	100	300	500	100	300	500
Tempo fixo	0,81	1,02	1,22	1,03	2,47	4,60	1,58	3,86	4,74
Tempo atuado	0,69	0,90	1,08	1,14	4,04	6,03	2,40	4,95	5,63
Tempo fixo com contagem regressiva	0,83	1,09	1,33	1,13	4,14	6,23	1,65	4,44	5,21

Quadro 22 – Número de paradas por veículo do movimento de viragem à esquerda da via secundária

Nº DE PARADAS POR VEÍCULO MOVIMENTO DE VIRAGEM À ESQUERDA VIA SECUNDÁRIA									
Taxa de saturação	30%			60%			90%		
Peões/h/sentido	100	300	500	100	300	500	100	300	500
Tempo fixo	0,82	0,84	0,88	1,01	1,96	3,41	1,38	3,27	3,90
Tempo atuado	0,66	0,73	0,76	1,18	3,43	4,85	2,17	3,99	4,34
Tempo fixo com contagem regressiva	0,83	0,86	0,90	1,10	3,00	4,49	1,38	3,88	4,20

5.3. INDICADORES DOS MOVIMENTOS PEDONAIS

Os indicadores de desempenho dos movimentos pedonais são obtidos em função das áreas criadas no *software* Vissim, porém, como o local de travessia dos peões foi modelado na rede como um *link*, foi necessária, para a obtenção dos dados de saída, a criação de seções no local da travessia e nas duas áreas de espera para a travessia. Esses pontos tiveram as nomenclaturas definidas conforme a Figura 28.

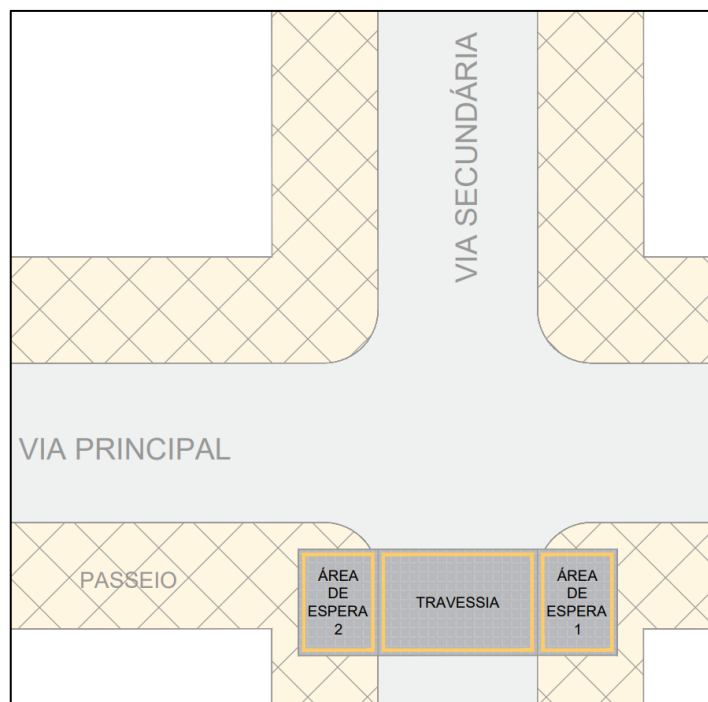


Fig. 28 – Áreas de análise dos movimentos pedonais

5.3.1. DENSIDADE MÉDIA

A densidade média foi avaliada na travessia dos peões e nas áreas de espera para a travessia. Observou-se que a densidade média da travessia pedonal não sofreu alterações significativas entre as diferentes regulações semaforicas independente da taxa de saturação e do débito pedonal, tendo variado no máximo em 0,01 peão/m² (Quadro 23). Salienta-se que em todos os 27 cenários o Nível de Serviço obtido na passadeira foi A, visto que todas as densidades estão abaixo de 0,18 peão/m², a demonstrar assim que todas as estratégias atendem as necessidades dos peões quanto ao espaço disponível para a travessia.

Quadro 23 – Densidade média na travessia pedonal

DENSIDADE MÉDIA DA TRAVESSIA (peão/m ²)									
Taxa de saturação	30%			60%			90%		
Peões/h/sentido	100	300	500	100	300	500	100	300	500
Tempo fixo	0,01	0,05	0,08	0,02	0,05	0,09	0,02	0,05	0,09
Tempo atuado	0,01	0,05	0,08	0,01	0,05	0,08	0,02	0,05	0,09
Tempo fixo com contagem regressiva	0,01	0,05	0,08	0,02	0,05	0,09	0,02	0,05	0,10

A densidade média nas áreas de espera teve uma leve diminuição na regulação por semáforo atuado em todas as taxas de saturação, visto que os peões necessitam aguardar o início da fase pedonal por menos tempo, o que diminui a acumulação de peões nas áreas de espera 1 e 2 (Quadro 24 e Quadro 25).

O comportamento das estratégias de tempos fixos sem e com contagem regressiva foi semelhante, sendo que a diferença obtida é justificada pela alteração do parâmetro *minimum gap time*. Ou seja, a estratégia a tempos fixos com contagem regressiva faz com que os peões somente aceitem brechas maiores e, conseqüentemente, gera maior acumulação nas áreas de espera.

Em relação ao Nível de Serviço associados a cada área de espera, assim como no local da travessia, em todos os cenários analisados obteve-se tanto na área 1 como na área 2 LOS A, visto que todas as densidades se encontram abaixo de 0,83 peão/m².

Quadro 24 – Densidade média na área de espera 1

DENSIDADE MÉDIA DA ÁREA DE ESPERA 1 (peão/m ²)									
Taxa de saturação	30%			60%			90%		
Peões/h/sentido	100	300	500	100	300	500	100	300	500
Tempo fixo	0,02	0,06	0,10	0,04	0,12	0,19	0,09	0,23	0,31
Tempo atuado	0,02	0,05	0,08	0,03	0,08	0,13	0,06	0,15	0,21
Tempo fixo com contagem regressiva	0,02	0,08	0,13	0,05	0,16	0,24	0,10	0,26	0,38

Quadro 25 – Densidade média área de espera 2

DENSIDADE MÉDIA DA ÁRA DE ESPERA 2 (peão/m ²)									
Taxa de saturação	30%			60%			90%		
Peões/h/sentido	100	300	500	100	300	500	100	300	500
Tempo fixo	0,03	0,08	0,15	0,05	0,15	0,25	0,10	0,27	0,37
Tempo atuado	0,02	0,08	0,13	0,04	0,11	0,19	0,07	0,18	0,27
Tempo fixo com contagem regressiva	0,03	0,11	0,19	0,06	0,19	0,31	0,11	0,30	0,46

5.3.2. ATRASO PEDONAL

Assim como na densidade, o semáforo atuado também apresentou melhores desempenhos no atraso pedonal, visto que possui ciclos menores e, conseqüentemente, tempos de espera menores. Essa

diminuição no atraso ocorreu em todos os cenários de taxa de saturação veicular e fluxo pedonal, tanto na área de espera 1 (Figura 29, Figura 30 e Figura 31) quanto na área de espera 2 (Figura 32, Figura 33 e Figura 34).

A estratégia de tempos fixos com contagem regressiva apresentou atrasos maiores em relação à estratégia de tempos fixos sem contagem regressiva, devido ao fato de que se alterou somente o parâmetro de brechas mínimas aceitáveis pelos peões para realizar a travessia. Portanto, quando há a contagem regressiva, essas brechas mínimas são maiores e geram mais atraso no movimento pedonal.

É possível obter o Nível de Serviço pedonal pela densidade, mas também pelo atraso médio, sendo que atrasos até 10 s/peão, representam LOS A. Observa-se, portanto, que 94% dos cenários obtiveram Nível de Serviço em A, a corroborar com o LOS encontrado em função da densidade.

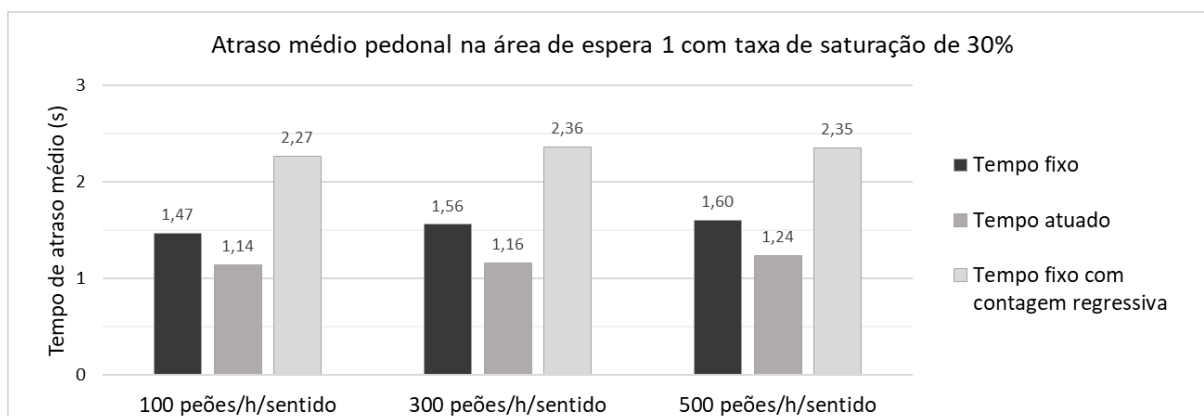


Fig. 29 – Atraso médio pedonal na área de espera 1 com taxa de saturação de 30%

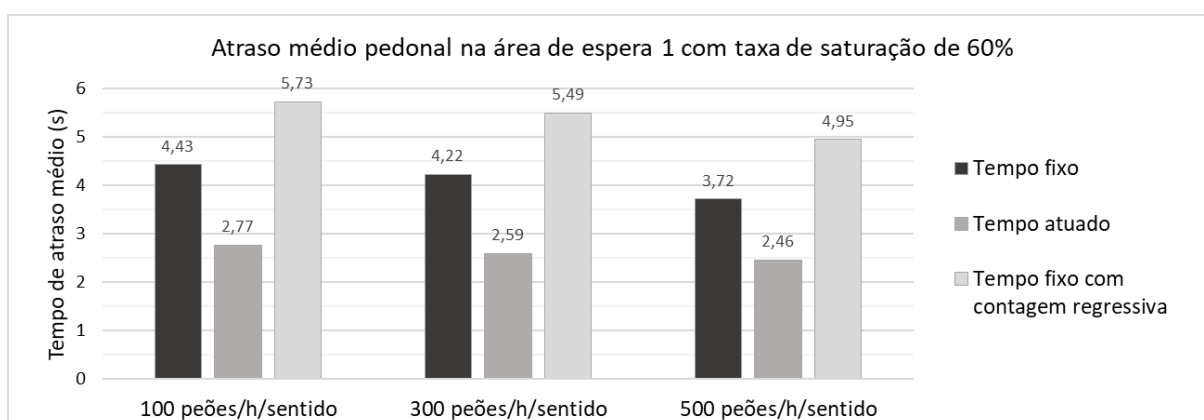


Fig. 30 – Atraso médio pedonal na área de espera 1 com taxa de saturação de 60%

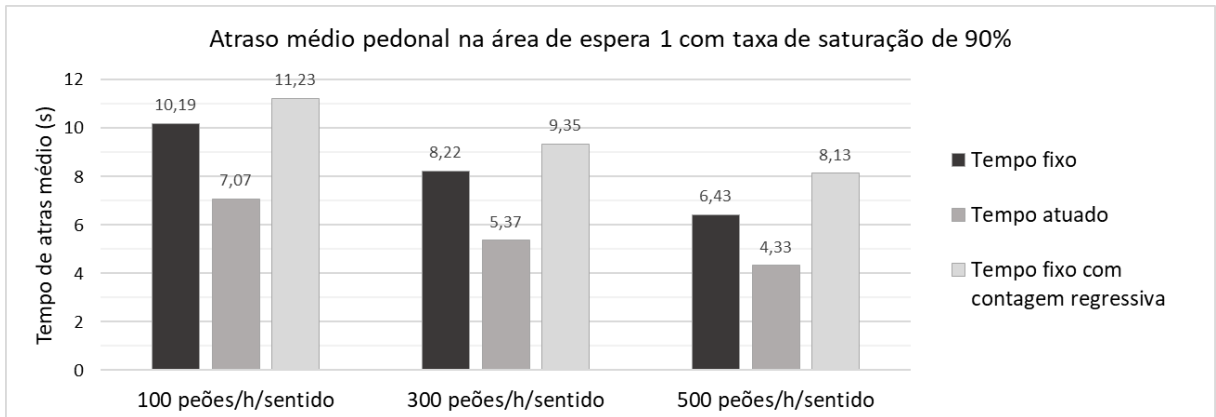


Fig. 31 – Atraso médio pedonal na área de espera 1 com taxa de saturação de 90%

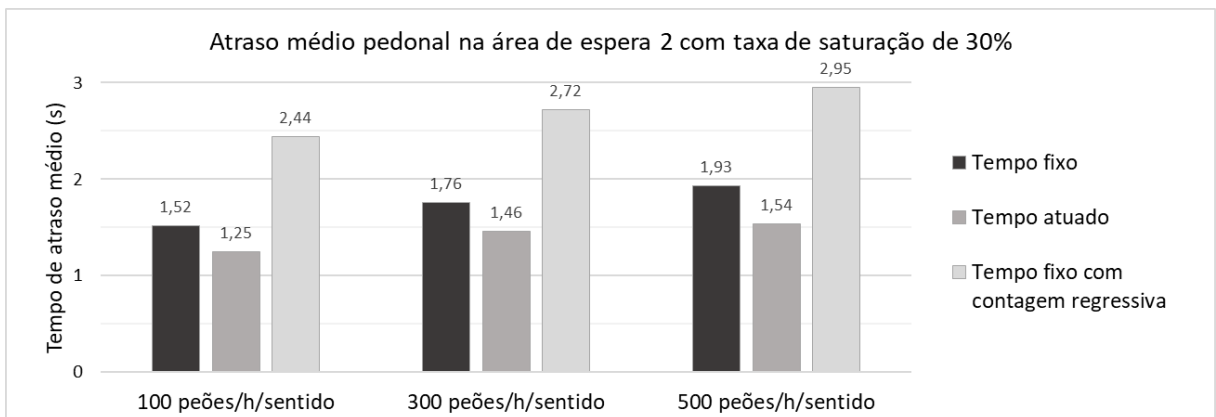


Fig. 32 – Atraso médio pedonal na área de espera 2 com taxa de saturação de 30%

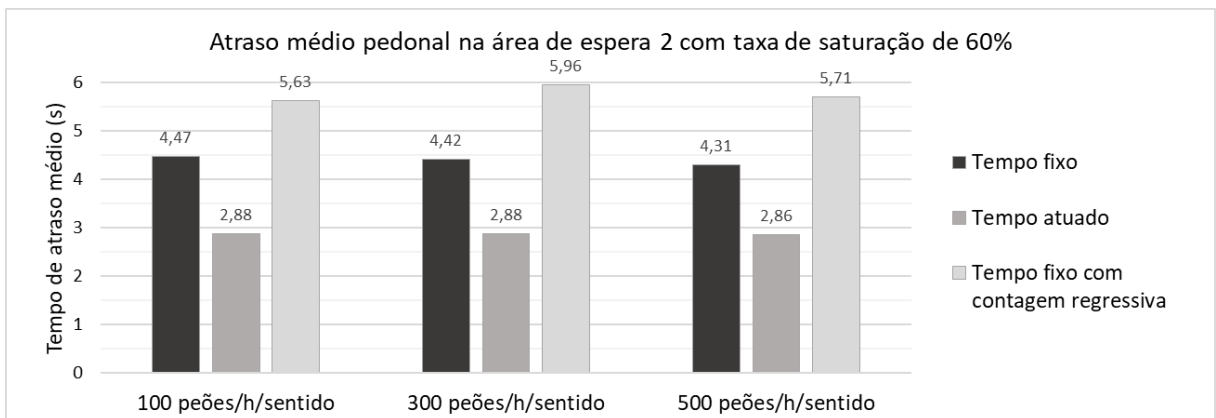


Fig. 33 – Atraso médio pedonal na área de espera 2 com taxa de saturação de 60%

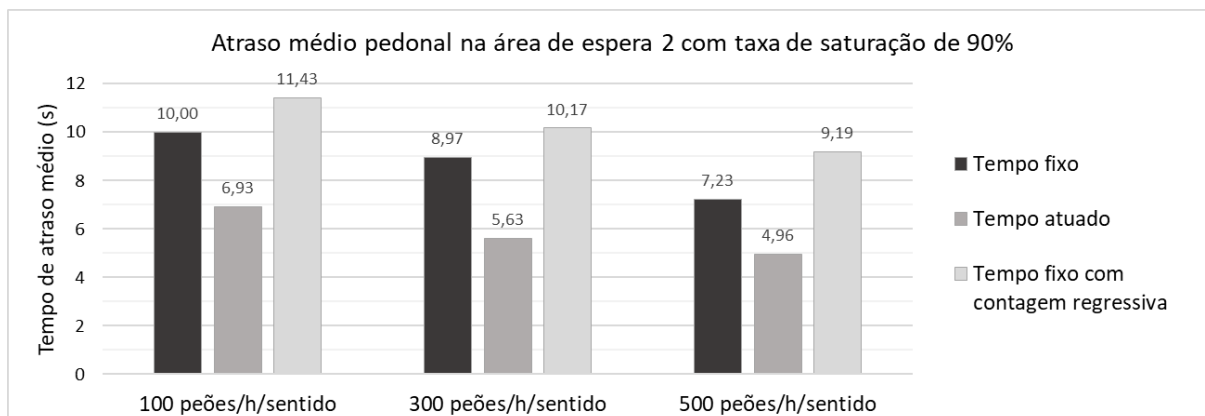


Fig. 34 – Atraso médio pedonal na área de espera 2 com taxa de saturação de 90%

5.3.3. PERCENTAGEM DE PEÕES DESOBEDIENTES

Os peões desobedientes são aqueles que caso encontrem oportunidade de realizar o atravessamento durante o tempo de vermelho pedonal, serão oportunistas e desobedientes à regulação semafórica e irão realizar a travessia. Ressalta-se que 100% dos peões foram modelados como desobedientes.

A percentagem de desobediência dos peões nas diferentes taxas de saturação e fluxos pedonais, para cada uma das estratégias analisadas estão apresentadas na Figura 35, Figura 36 e Figura 37.

A estratégia a tempos atuados gerou maior obediência dos peões aos sinais luminosos em alguns cenários. Essa obediência ocorre devido ao fato de haver mais oportunidades para o peão realizar a travessia, e não necessariamente por uma mudança comportamental na modelação. Ou seja, o peão não deixa de ser oportunista, mas não tem necessidade da utilização da brecha para realizar a travessia, porque a fase inicia antes da oportunidade de ele cometer uma infração.

Obteve-se êxito na busca de modelar a estratégia a tempos fixos com contagem regressiva com maior índice de obediência dos peões em relação a estratégia a tempos fixos sem contagem regressiva, visto que em todos os cenários de procura a percentagem de peões desobedientes é menor na estratégia com contagem regressiva. Porém, essa diminuição apresentou baixos valores em algumas situações, tendo variado somente 1% a desobediência pedonal.

É válido recordar que somente um parâmetro foi alterado referente à modificação da desobediência pedonal entre as estratégias de tempos fixos. Portanto, ainda que tenha se atingido o objetivo do estudo, outros parâmetros como velocidade do peão e diferentes tempos mínimos de brecha representando diferentes tipos de peões poderiam criar um modelo mais realista.

No geral, houve uma alta desobediência dos peões em todos os cenários, independente da estratégia, sendo a menor taxa encontrada de 87%. Isso demonstra o alto índice de oportunidades que ocorrem ao longo do período de análise para que os peões sejam infratores nas diferentes estratégias de regulação entre os diferentes cenários.

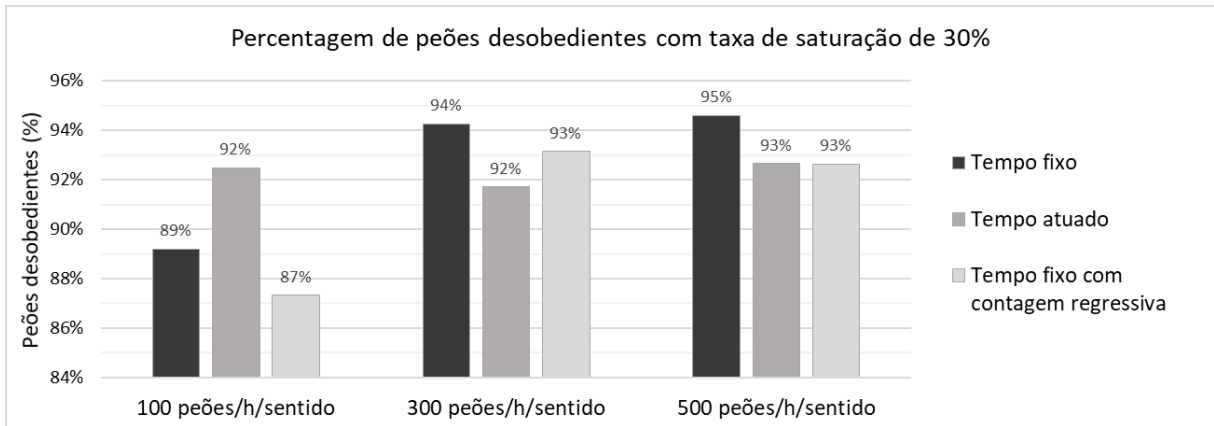


Fig. 35 – Percentagem de peões desobedientes com taxa de saturação de 30%

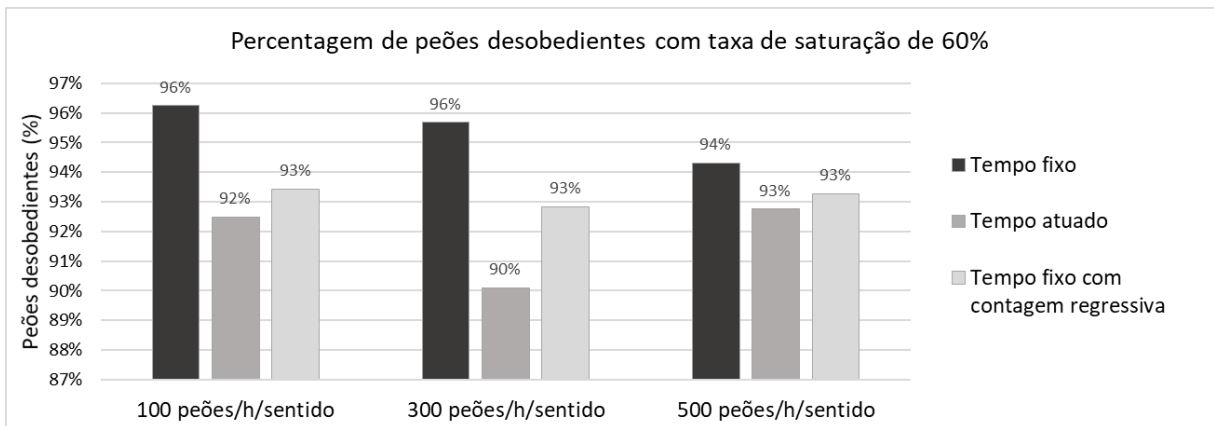


Fig. 36 – Percentagem de peões desobedientes com taxa de saturação de 60%

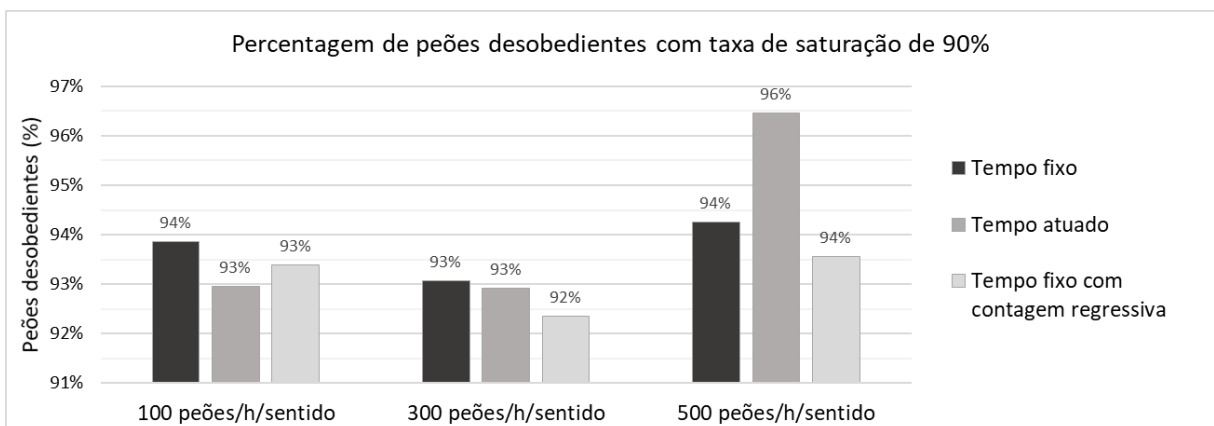


Fig. 37 – Percentagem de peões desobedientes com taxa de saturação de 90%

5.4. AVALIAÇÕES GERAIS

Em todos os 27 cenários analisados para cada um dos indicadores de desempenho, nota-se que, assim como esperado, o aumento tanto de débito pedonal, como da taxa de saturação veicular, fez com que todos os indicadores resultassem em pioras no desempenho, independente da regulação semafórica analisada.

Quando comparada a estratégia a tempos fixos sem e com contagem regressiva, mesmo que somente um parâmetro pedonal tenha sido alterado, observa-se mudanças relevantes nos diferentes cenários, mostrando que pequenas alterações no modelo podem provocar resultados expressivos devido a sua sensibilidade.

Ao buscar melhor desempenho no movimento pedonal, percebe-se que a estratégia a tempos atuados surge como melhor alternativa, pois diminui o tempo de atraso dos peões para realizar a travessia, conseqüentemente diminui a densidade das áreas de espera e, por fim, apresentou no geral percentagens mais baixas de peões desobedientes, o que gera maior segurança no cruzamento. A estratégia a tempos fixos com contagem regressiva buscou obter maior obediência pedonal a fim de gerar maior segurança, porém, em contrapartida, como expectável, gerou maiores tempos de atraso e maior densidade nas áreas de espera.

Em relação aos indicadores de desempenho veiculares, não é possível determinar qual a melhor estratégia de regulação para que os indicadores de desempenho globais sejam melhores. Enquanto, por exemplo, a estratégia a tempos atuados gera no geral menor número de paradas por veículo, não é a estratégia que apresenta melhor desempenho nos demais indicadores.

Portanto, a melhor estratégia de regulação semafórica com base nos indicadores de desempenho analisados depende, necessariamente, do que se pretende melhorar em detrimento da piora de outros parâmetros.

6

CONCLUSÃO

6.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como já referido, é nos cruzamentos onde há as maiores perdas de capacidade da rede viária, bem como, onde surgem os principais gargalos do tráfego dos centros urbanos. Este trabalho utilizou de ferramentas de microssimulação de tráfego num cruzamento típico brasileiro e obteve resultados satisfatórios.

Observou-se que o semáforo atuado é eficiente em alguns cenários, contudo, em outros ele gera piores índices de desempenho em comparação com os semáforos de tempo fixo sem e com contagem regressiva. Há de se considerar que o controle semaforico deve ser implementado para gerir o fluxo de tráfego, não tendo potencial de sanar todos os problemas de mobilidade urbana. Assim, é razoável afirmar que uma estratégia traz benefícios em alguns aspectos e pioras em outro, não sendo verificado, portanto, nenhuma estratégia que apresentasse os melhores resultados globais em termos de desempenho.

A ferramenta Viswalk colaborou positivamente na modelagem dos peões. Verificou-se que os peões desobedientes de fato provocam piora nos indicadores de desempenho veiculares, além de aumentarem os riscos de atropelamento. Encontrou-se dificuldades na sua modelagem, visto haver muitas variáveis que incidem sobre esse comportamento. Por exemplo, um peão apesar de ser desobediente, não necessariamente terá comportamento de um infrator, por falta de oportunidades, as quais variam em função do tipo do controle semaforico.

De forma geral, o Vissim mostrou ser uma ferramenta bastante útil no planejamento e gestão de tráfego. Entretanto, é válido salientar a sua sensibilidade quando se altera os parâmetros. Pequenas alterações provocam *outputs* completamente distintos, o que comprova a necessidade e importância das etapas de calibração e validação do modelo, cujo objetivo é se aproximar ao máximo da realidade estudada.

Pode-se afirmar que nos grandes centros urbanos, onde há presença de elevado número de peões, a implantação da estratégia a tempo atuado pode melhorar o nível de serviço na área de espera e no trajeto pedonal, o que é bastante positivo no ponto de vista de medidas de incentivo a modos sustentáveis de deslocação.

Por fim, conclui-se que é de fundamental importância construir um modelo que represente a realidade em seus diferentes cenários, e planejar a atuação de cada estratégia com o conhecimento tanto dos benefícios quanto da piora que ela causará no cruzamento em questão, em função dos diferentes cenários que de fato se alternam na realidade.

6.2. INVESTIGAÇÕES FUTURAS

A fim de aumentar o conhecimento da área de microssimulação de tráfego, no que diz respeito as análises em cruzamentos semaforizados e a interação entre veículos e peões nos pontos de travessia, recomenda-se que os trabalhos futuros investiguem alguns aspectos não abordados nesta dissertação, nomeadamente:

- Alteração de parâmetros na modelação da estratégia com contagem regressiva;

Ainda que se atingiu o objetivo de modelar a estratégia a tempos fixos com contagem regressiva de forma aos peões terem um comportamento mais obediente, outros parâmetros como velocidade do peão e diferentes tempos mínimos de brecha representando diferentes tipos de peões poderiam criar um modelo mais realista.

- Utilizar outras estratégias de regulação semafórica no cruzamento;

Propõe-se para trabalhos futuros que sejam analisados os indicadores de desempenho no cruzamento base dessa dissertação com outras estratégias de regulação semafórica. Como sugestão, estratégias com atravessamento com oposição veicular poderia trazer resultados interessantes.

- Criação de diferentes cenários na composição pedonal;

De forma a complementar a simulação e as análises feitas neste estudo, sugere-se a criação de cenários com alteração na composição pedonal, incluindo variações de idades e género, bem como alterações de velocidade associadas a desobediência de cada tipo de peão.

- Modelar uma interseção em T.

Visto que não somente cruzamentos semaforizados em cruz geram pontos de conflito veicular e pedonal, bem como são os locais com redução de capacidade nas vias, sugere-se que sejam analisados indicadores de desempenho com diferentes estratégias de regulação em interseções em T.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Austroroads. (1995). *Guide to traffic engineering practice. Part 13: Pedestrians*. Austroroads, Sydney.
- Bandeira, T. P. (2019). *A Method for Microscopic Modeling of Pedestrian Delay at Signalized Crossings*. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará.
- CONTRAN. (2007). *Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito. Vol. IV – Sinalização Horizontal*. DENATRAN, Brasília.
- CONTRAN. (2014). *Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito. Vol. V – Sinalização Semafórica*. DENATRAN, Brasília.
- Costa, A. H. P., Seco, A. J. M., Vasconcelos, A. L. P. (2008). *Manual de Planeamento das Acessibilidades e da Gestão Viária. Vol. 07 – Sinais Luminosos*. CCDRN, Portugal.
- Fries, R., Qi, Y., Leight, S. (2017). *How many times should I run the model? Performance measure specific findings from Vissim models in Missouri*. TRB 2017 Annual Meeting, Washington DC.
- Friis, C., Svensson, L. (2013). *Pedestrian Microsimulation: A comparative study between the software programs Vissim and Viswalk*. Dissertação de Mestrado do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Chalmers University of Technology.
- Golakiya, H. D., Dhamaniya, A. (2019). *Evaluation LOS at Urban Midblock Section under the Influence os Crossing Pedestrians in Mixed Traffic Conditions*. World Conference on Transport Research – WCTR, 26-31 maio de 2019, Mumbai, p. 777-792, Elsevier.
- Jacobsen, A. C. (2011). *Microsimulação da travessia de pedestres*. Dissertação de Mestrado na área de concentração em Sistemas de Transportes, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- King, M. J., Soole, D., Ghafourian, A. (2009). *Illegal pedestrian crossing at signalized intersections: Incidence and relative risk*. Accident Analysis and Prevention, 41(3). p. 485-490, Brisbane.
- Langbroek, J., Ceunynck, T., Daniels, S., Svensson, A., Lareshyn, A., Brijs, T., Wets, G. (2012) *Analyzing interactions between pedestrians and motor vehicles at two-phase signalized intersections – An explorative study combining traffic behavior and traffic conflict observations in a cross-national context*. In: *Proceedings of 25th ICTC*. p. 1-21.
- Lei nº 9.503/1997 de 23 de setembro. *Institui o Código de Trânsito Brasileiro*. Presidência da República, Brasil.
- Liu, R. Silva, J. P. C., Seco, A. J. M. (2000). *A Bi-Modal Microsimulation Tool for the Assessment of Pedestrian Delays and Traffic Management*. 9th International Association of Travel Behavior Research Conference, Gold Coast.
- Ming, S. H. (2016). *Semáforos com contagem regressiva*. NT 252, Companhia de Engenharia de Tráfego – CET.

Matos, C. G. (2020). *Impacto de Sistemas Semafóricos de Contagem Regressiva no Comportamento dos Peões*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Urbanismo, Transportes e Vias de Comunicação, Universidade de Coimbra.

Ortúzar, J. D., Willumsen, L. G. (2011). *Modelling Transport*. John Wiley & Sons Ltd, Reino Unido.

PTV. (2017). *Webinar: Crating a simple actuated signal control logic with VisVAP*. <https://www.youtube.com/watch?v=YKvNQA9jXhI>. Maio de 2021.

PTV. (2018). *PTV Vissim 10: User Manual*. PTV AG, Karlsruhe.

Seco, A. J. M, Macedo, J. M. G., Costa, A. H. P. (2008). *Manual de Planeamento das Acessibilidades e da Gestão Viária. Vol. 08 – Peões*. CCDRN, Portugal.

TRB. (2000). *Highway Capacity Manual*. Transportation Research Board, National Academy of Sciences, Washington DC.

TRB. (2016). *Highway Capacity Manual*. Transportation Research Board, National Academy of Sciences, Washington DC.

Werberich, B. R. (2013). *Modelagem de Pedestres: comportamento em travessia e escolha de rota*. Dissertação de Mestrado na área de concentração em Sistemas de Transportes, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Xiong, H., Xiong, L., Deng, X., Wang, W. (2014). *Evaluation of the Impact of Pedestrian Countdown Signals on Crossing Behavior*. Hindawi Publishing Corporation, Heiner Bubb, Nova Iorque.

Yang, J. Deng, W., Wang, J., Li, Q. Wang, Z. (2006). *Modeling pedestrians' roas crossing behavior in traffic system micro-simulation in China*. Transport Research Part A 40, p. 280-290, Elsevier.