

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**Douglas Zechin**

**APLICABILIDADE DE RAMP METERING NA BR-290  
UTILIZANDO O ALGORITMO ALINEA**

Porto Alegre  
dezembro 2016

**DOUGLAS ZECHIN**

**APLICABILIDADE DE RAMP METERING NA BR-290  
UTILIZANDO O ALGORITMO ALINEA**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

**Orientadora: Helena Beatriz Bettella Cybis**  
**Coorientador: Felipe Caleffi**

Porto Alegre  
dezembro 2016

**DOUGLAS ZECHIN**

**APLICABILIDADE DE RAMP METERING NA BR-290  
UTILIZANDO O ALGORITMO ALINEA**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pela Professora Orientadora e pela Comissão de Graduação (COMGRAD) da Engenharia Civil na Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, Dezembro de 2016

Profa. Helena Beatriz Bettella Cybis  
Doutora pela University of Leeds  
Orientadora

Prof. Felipe Caleffi  
Mestre pela Universidade Federal do Rio  
Grande do Sul  
Coorientador

Profa. Ana Margarita Larrañaga Uriarte  
Doutora pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Relatora

**BANCA EXAMINADORA**

**Profa. Helena Beatriz Bettella Cybis**  
**(UFRGS)**  
Doutora pela University of Leeds

**Prof. Felipe Caleffi**  
**(UFRGS)**  
Mestre pela Universidade Federal do Rio  
Grande do Sul

**Prof. Carlos Oliva Pretto**  
**(UFPEL)**  
Doutor pela Universidade Federal do Rio  
Grande do Sul

**Profa. Ana Margarita Larrañaga Uriarte**  
**(UFRGS)**  
Doutora pela Universidade Federal do Rio  
Grande do Sul

Dedico este trabalho a meus pais João Roque e Magda, que sempre estiveram ao meu lado e tanto me apoiaram no decorrer de minha graduação.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à Profa. PhD Helena Beatriz Bettella Cybis e ao Mr. Felipe Caleffi, respectivamente orientadora e coorientador deste trabalho, por todo o suporte oferecido desde a decisão do tema a ser discutido até a conclusão do mesmo.

À Laísa Kappler e ao Guilherme Affonso Puglia, colegas de bolsa de iniciação científica, que sempre me auxiliaram nas pesquisas.

A meus amigos e familiares, que sempre me dirigiram palavras de apoio e motivação, criando sempre um ambiente construtivo e aberto de produção.

À minha namorada Bruna Souza Passos e a meus pais João Roque Zechin e Magda Didoné Zechin, que sempre me auxiliaram incondicionalmente e com todo o carinho nos momentos de dificuldade.

Ideias, somente ideais, podem iluminar a escuridão.

*Ludwig von Mises*

## RESUMO

*Ramp metering* é uma estratégia de gerenciamento ativo de tráfego amplamente utilizada em países desenvolvidos e ainda não aplicada em rodovias brasileiras. Os efeitos benéficos desta medida são bastante sensíveis à sua calibração e dependem dos problemas a serem resolvidos em cada situação específica. Este trabalho apresenta uma abordagem inicial a um projeto de aplicação de *ramp metering* em uma rodovia genérica com o comportamento dos veículos calibrado para representar as condições da BR-290 na região metropolitana de Porto Alegre, trecho que possui problemas de congestionamento e segurança em horários de pico. São levantados e discutidos os aspectos geométricos e conceituais que envolvem esta estratégia segundo manuais internacionais e então é apresentado um modelo utilizando o algoritmo ALINEA como atuador do sistema. O proposto é simulado no *software* de microsimulação de tráfego VISSIM através da variação de parâmetros chave do modelo e da adoção de valores recomendados pelos manuais internacionais. Finalmente são comparados os efeitos da aplicação da medida com o caso onde ela não é utilizada, assim como os valores utilizados para os parâmetros de calibração.

Palavras-chave: Ramp metering. VISSIM. Calibração. Simulação de tráfego.

## **ABSTRACT**

Ramp metering is an active traffic management strategy widely used in developed countries, and still not applied in Brazilian highways. The beneficial effects of this measure are quite sensitive to their calibration and depend heavily on the problems to be solved at each specific situation. This paper presents an initial approach to a ramp metering application project in a generic highway with the vehicles' behavior calibrated to represent the conditions of the BR-290 in the metropolitan area of Porto Alegre, that has congestion and safety problems in peak hours. Geometric and conceptual aspects involving this strategy are raised and discussed according to international manuals and then a model using the ALINEA algorithm as the system actuator is presented. The model is simulated in the traffic microsimulation software VISSIM, varying key parameters of the model and adopting values recommended by international manuals. Finally the effects of using and not using ramp metering are compared, as well as the values used for the calibration parameters.

Palavras-chave: Ramp metering. VISSIM. Calibration. Traffic Simulation.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Configuração básica do <i>ramp metering</i> .....	20
Figura 2 - Passagem do regime de fluxo livre para congestionado .....	21
Figura 3 - Fenômeno breakdown .....	22
Figura 4 - Mapa do uso de <i>ramp metering</i> nos EUA.....	23
Figura 5 - Benefícios do <i>ramp metering</i> .....	24
Figura 6 - Detectores para o algoritmo ALINEA .....	31
Figura 7 - Geometria do <i>ramp metering</i> .....	34
Figura 8 - Distância de aceleração .....	35
Figura 9 - Modelo geométrico .....	43
Figura 10 - Detalhamento da região do semáforo.....	43
Figura 11 - Local de teste do <i>ramp metering</i> .....	44
Figura 12 - Patamares críticos de volume, ocupação e velocidade, para o km 94 no VISSIM.....	46
Figura 13 - Tempo de viagem médio na rampa de acesso.....	48
Figura 14 - Comprimento médio e máximo de fila na rampa de acesso.....	49
Figura 15 - Perfil de fila máximo na rampa de acesso.....	50
Figura 16 - Trocas de faixa no trecho que compreende o taper da rampa (Faixas 3 e 4) .....	51
Figura 17 - Trocas de faixa por faixa.....	51
Figura 18 - Perfil das trocas de faixa no trecho que compreende o taper da rampa (Faixas 2, 3 e 4) .....	52

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 - Tipos de detectores e características.....	27
---	----

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Tempos recomendados para operação com uma faixa .....	29
Tabela 2 - Recomendações para escolha de local de implementação.....	40

## **LISTA DE SIGLAS**

ALINEA – Asservissement Linéaire d'Entrée Autoroutiere

CENTRICO – Central European Region Transport Telematics Implementation Project

CONTRAN – Conselho Nacional de Trânsito

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

FIRJAN – Federação das Indústrias do Estado do Rio de Janeiro

HOV – High Occupancy Vehicle

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>DIRETRIZES DA PESQUISA.....</b>	<b>17</b>
2.1	QUESTÕES DE PESQUISA.....	17
2.2	OBJETIVOS DE PESQUISA .....	17
2.2.1	<i>Objetivo principal.....</i>	<i>17</i>
2.2.2	<i>Objetivos secundários.....</i>	<i>17</i>
2.3	PRESSUPOSTO .....	18
2.4	LIMITAÇÕES.....	18
2.5	DELINEAMENTO.....	18
<b>3</b>	<b>RAMP METERING, UM OVERVIEW .....</b>	<b>20</b>
3.1	OBJETIVOS DO RAMP METERING.....	21
3.1.1	<i>Breakdown .....</i>	<i>21</i>
3.1.2	<i>Objetivos secundários do ramp metering .....</i>	<i>22</i>
3.2	HISTÓRIA E EXPERIÊNCIAS INTERNACIONAIS.....	23
3.3	BENEFÍCIOS DO RAMP METERING .....	24
<b>4</b>	<b>ELEMENTOS DO RAMP METERING.....</b>	<b>25</b>
4.1	SINALIZAÇÃO SEMAFÓRICA.....	25
4.1.1	<i>Sinalização de passagem .....</i>	<i>26</i>
4.1.2	<i>Sinalização de advertência .....</i>	<i>26</i>
4.2	DETECTORES.....	26
<b>5</b>	<b>OPERAÇÃO.....</b>	<b>28</b>
5.1	TIPOS DE OPERAÇÃO.....	28
5.1.1	<i>Uma faixa e um veículo por verde.....</i>	<i>28</i>
5.1.2	<i>Uma faixa e múltiplos veículos por verde.....</i>	<i>28</i>
5.1.3	<i>Duas faixas.....</i>	<i>29</i>
5.2	ESTRATÉGIAS.....	29
5.2.1	<i>Estratégias de tempo fixo.....</i>	<i>30</i>
5.2.2	<i>Estratégias locais.....</i>	<i>30</i>
5.2.3	<i>Estratégias sistêmicas.....</i>	<i>30</i>
5.3	ALGORITMO ALINEA .....	30
5.3.1	<i>Outros algoritmos .....</i>	<i>32</i>
5.4	QUESTÕES LOCAIS A SE CONSIDERAR.....	32

<b>6</b>	<b>GEOMETRIA .....</b>	<b>34</b>
6.1	DISTÂNCIA DE ACELERAÇÃO .....	35
6.2	DISTÂNCIA DE ESTOQUE DE FILA .....	36
6.3	POSIÇÃO DA FAIXA DE PARADA .....	37
<b>7</b>	<b>IMPLEMENTAÇÃO.....</b>	<b>39</b>
7.1	ESCOLHA DO LOCAL .....	39
<b>8</b>	<b>SIMULAÇÃO.....</b>	<b>41</b>
8.1	SIMULADOR VISSIM .....	41
8.2	MODELO UTILIZADO .....	41
8.2.1	<i>Aspectos geométricos.....</i>	<i>42</i>
8.3	CALIBRAÇÃO DO MODELO .....	43
8.3.1	<i>Modelagem do ramp metering.....</i>	<i>45</i>
<b>9</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>48</b>
9.1	DESEMPENHO DO TRÁFEGO NA RAMPA DE ACESSO.....	48
9.2	PERFORMANCE DO TRÁFEGO NA RODOVIA.....	50
<b>10</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>53</b>
<b>11</b>	<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>54</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A quantidade de veículos nas estradas tem crescido significativamente há muitos anos e, conseqüentemente, também têm aumentado o número de congestionamentos, os tempos de viagem e os conflitos de trânsito (CALEFFI; MOISAN; CYBIS, 2016). Para que seja possível suprir essa demanda é preciso fazer ajustes na matriz rodoviária, sempre levando em conta os custos dessas mudanças.

Um estudo da FIRJAN (2015) mostra que, no Brasil, para deslocamentos de mais de 30 minutos, 17 milhões de trabalhadores gastam mais de 114 minutos nestas viagens, gerando um desperdício de potencial produtivo maior que R\$ 111 bilhões anualmente. Entre os anos de 2011 e 2012 esse número teve um aumento de 304 mil pessoas, a população de uma cidade de médio porte. O estudo coloca Porto Alegre – RS, em quinto lugar no *ranking* de desperdício de potencial produtivo das capitais brasileiras, alcançando R\$ 3,4 bilhões em 2012, o que representa 2,9% de seu PIB.

Quanto a acidentes, dados do DNIT (2011) indicam que a maior parte dos acidentes ocorrem durante os horários de pico da manhã e do anoitecer e são majoritariamente por colisão traseira, transversal e devido a abalroamentos no mesmo sentido. O aumento do número de acidentes nesses horários possui relação direta com o aumento do volume de veículos nas estradas, mas também se deve levar em consideração os fatores secundários geradores de acidentes que este aumento implica, como o aumento do tamanho e do número de pelotões ingressando pelos acessos das grandes rodovias e os movimentos de para-e-arranca que se desenvolvem devido à extrapolação da capacidade das vias (LI et al., 2014).

Como descrito por Caleffi, Moisan e Cybis (2016), "o gerenciamento ativo de tráfego envolve um conjunto de técnicas que têm por objetivo gerenciar dinamicamente congestionamentos recorrentes e não recorrentes com base nas condições de tráfego existentes", sendo, portanto, uma alternativa considerável para a mitigação dos efeitos negativos dos congestionamentos. O mesmo estudo mostrou que o uso combinado de duas medidas de gerenciamento ativo de tráfego, velocidade variável e uso do acostamento, reduziram em 35% os tempos de viagem e 44% o número de trocas de faixa em simulações computacionais realizadas.

Como parte das possíveis medidas de gerenciamento ativo de tráfego existentes, uma das que tem apresentado bons resultados em todo o mundo é o *ramp metering*, tema central deste

trabalho. Apesar de antiga, esta prática – assim como o gerenciamento ativo de uma maneira geral – é pouquíssimo difundida no Brasil (CALEFFI; MOISAN; CYBIS, 2016) e carece de mais estudos quanto a sua aplicabilidade.

## 2 DIRETRIZES DA PESQUISA

As diretrizes para o desenvolvimento do trabalho são descritas nos próximos itens.

### 2.1 QUESTÕES DE PESQUISA

A questão de pesquisa do trabalho é: a implantação de um sistema de *ramp metering* nos acessos de uma rodovia da região metropolitana de Porto Alegre produz redução de congestionamentos e melhora geral na fluidez do trânsito de veículos?

### 2.2 OBJETIVOS DE PESQUISA

Os objetivos de pesquisa podem ser classificados em principal e secundário, e são descritos a seguir.

#### 2.2.1 Objetivo principal

O objetivo principal do trabalho é a verificação da adequação de um sistema de *ramp metering* em uma rodovia da região metropolitana de Porto Alegre através de simulação computacional.

#### 2.2.2 Objetivos secundários

Os objetivos secundários do trabalho se concentram em fazer análises para validação da medida adotada, como análises de conflito, fluxo, velocidade, ocupação e tempo de viagem por meio de simulações computacionais. Também deverão ser feitas calibrações no método para que este se adeque às características específicas da localidade de estudo e represente com maior precisão a realidade, uma vez que não existem aplicações práticas do mesmo no Brasil para nortear sua calibração.

## 2.3 PRESSUPOSTO

O trabalho proposto está sujeito à premissa de que a simulação computacional da aplicação de *ramp metering*, por ser feita sobre um cenário pré-calibrado que representa a situação atual da via, representa a realidade.

## 2.4 LIMITAÇÕES

São limitações do trabalho:

- a) A calibração do método não poderá ser feita de forma a maximizar seu funcionamento devido ao número de simulações necessárias para tal. Desse modo, serão calibrados apenas os fatores essenciais para o bom funcionamento do sistema.

## 2.5 DELINEAMENTO

O trabalho será realizado com base nas etapas a seguir, também descritas nos próximos parágrafos:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) escolha da via e da rampa de acesso;
- c) construção do modelo computacional;
- d) calibração do modelo computacional;
- e) simulação da interseção com e sem a utilização do método;
- f) análise dos resultados;
- g) conclusões.

A **pesquisa bibliográfica** foi realizada de modo a se construir o entendimento da concepção do *ramp metering*, seu *modus operandi*, casos de sucesso e insucesso, e as condições necessárias e desejáveis para que funcione corretamente. A pesquisa se inicia junto ao presente trabalho e se estenderá até o fim do mesmo, com vistas a mantê-lo atualizado em relação às várias publicações que vem sendo feitas e que são pertinentes ao tema aqui discorrido.

A **escolha da via e da rampa de acesso** decorrerá da pesquisa bibliográfica, a fim de se estudar uma interseção onde os requisitos sugeridos para a implementação do método pelos

manuais e artigos consultados sejam atendidos. Além disso, será importante considerar a disponibilidade de dados da via e de um modelo computacional já calibrado da mesma. Escolhida a interseção, será **construído o modelo computacional**, também com base nas recomendações colhidas nas leituras.

A **calibração do modelo computacional** ocorrerá quando o modelo estiver construído e representando a realidade, alterando-se os parâmetros chave do método *ramp metering*. Esta etapa ocorrerá concomitantemente com a de **simulação da interseção com e sem a utilização do método** para que através de um processo iterativo seja possível definir em que condições e com que parâmetros o método é mais eficaz na localidade escolhida.

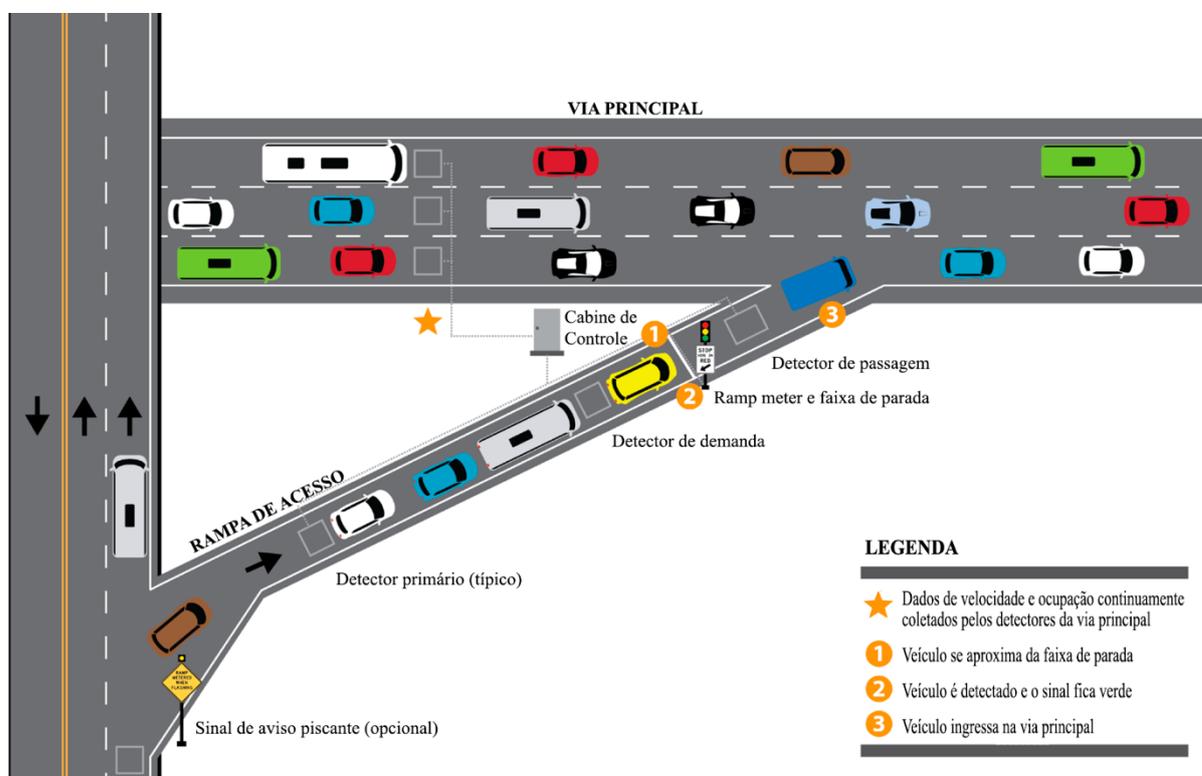
Por último, será feita uma **análise dos resultados** obtidos de forma a sintetizar a parametrização obtida e, em caso de sucesso, atestar o benefício do método.

### 3 RAMP METERING, UM *OVERVIEW*

*Ramp metering* é uma estratégia de gerenciamento ativo de tráfego que visa controlar a entrada de veículos em uma via com o objetivo de otimizar o seu fluxo (CAMBRIDGE SYSTEMATICS INCORPORATED, 2001; CHAUDHARY et al., 2004; CONTRERAS-SWEET; MEDINA; DAVIS, 2000; HIGHWAYS AGENCY, 2007; MIZUTA et al., 2014; SIMPSON; RILEY; UNITED CIVIL GROUP, 2013). Para tal, faz-se uso de um semáforo orientado por um algoritmo, tendo seu ciclo alterado de modo a controlar a taxa com que os veículos acessam a via principal.

Como pode ser visto na Figura 1, os veículos advindos de vias arteriais formam uma fila atrás da linha de parada e são gradativamente liberados ao sinal do semáforo a uma taxa ótima, levando em conta as condições da via principal. Embora essa seja a configuração mais usual, também podem existir faixas prioritárias para veículos de alta ocupação (HOV), configuração diferenciada dos detectores e outras alterações devidas à geometria e às políticas locais.

Figura 1 - Configuração básica do *ramp metering*

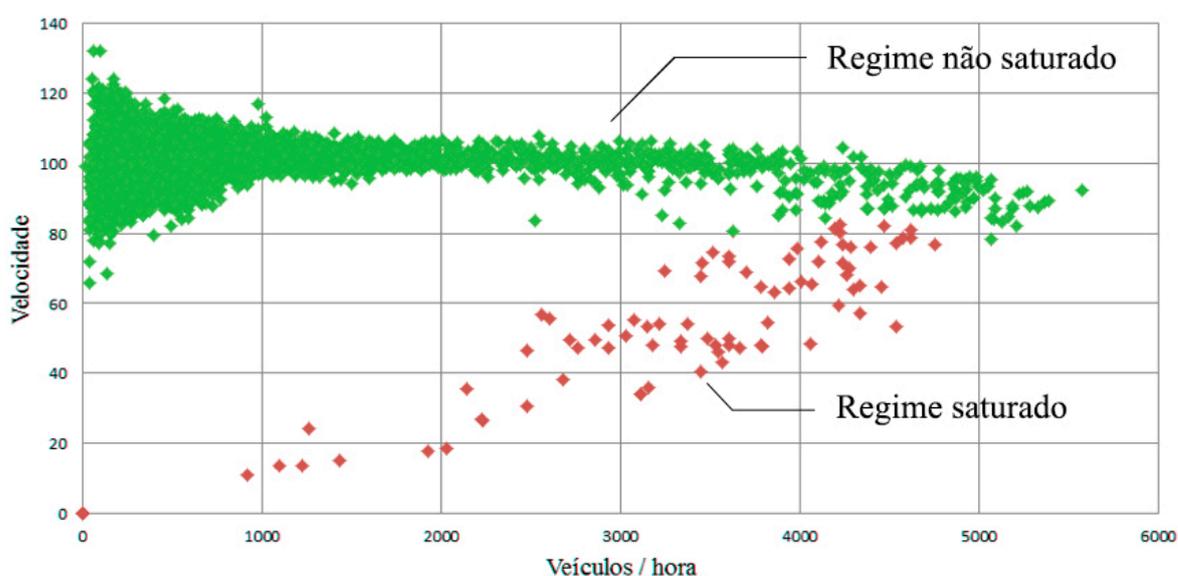


(fonte: adaptado de Mizuta et al., 2014, p. 2)

### 3.1 OBJETIVOS DO RAMP METERING

Dentre as principais maneiras com as quais o *ramp metering* contribui para uma melhora do fluxo da via, as mais importantes são a quebra de pelotões e o controle do volume de veículos (CAMBRIDGE SYSTEMATICS INCORPORATED, 2001; CHAUDHARY et al., 2004). A quebra dos pelotões se dá uma vez que em sistemas deste tipo, de modo geral, os ciclos semafóricos são suficientemente curtos para que apenas um veículo passe por verde. Dessa forma, a via principal recebe um fluxo mais homogêneo de seus acessos, permitindo imersões mais suaves e evitando movimentos de para-e-arranca, os quais geram um efeito cascata e acabam resultando em congestionamentos e colisões traseiras e laterais. Já o controle do volume de veículos tem como objetivo impedir que se passe de uma condição de fluxo não saturado para saturado, como ilustra a Figura 2.

Figura 2 - Passagem do regime de fluxo livre para congestionado



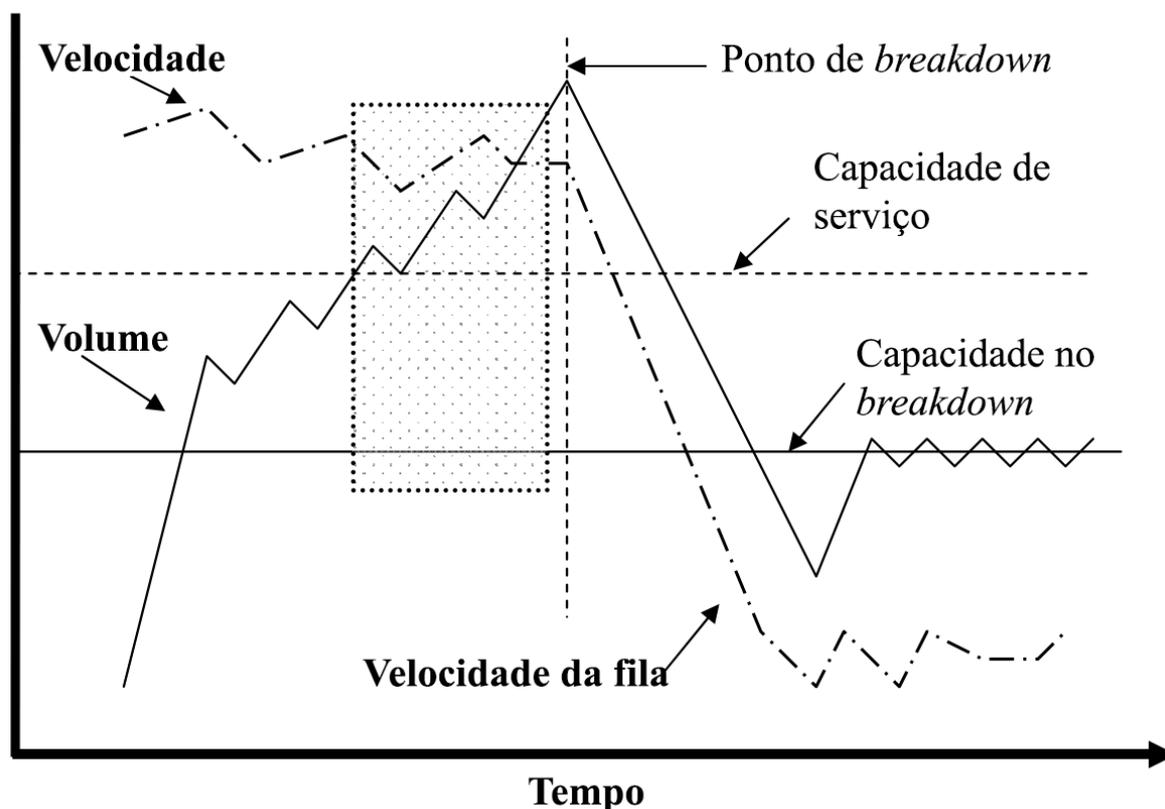
(fonte: elaborado pelo autor)

#### 3.1.1 Breakdown

A passagem do regime de fluxo não saturado para saturado se dá pela ocorrência do fenômeno designado *breakdown*, como descrito por Persaud et al. (2001). Conforme a demanda aumenta, as velocidades tendem a decrescer, porém se mantém próximas à velocidade de fluxo livre. A área sombreada da Figura 3 indica a região onde começa a se desenhar o *breakdown*, em que as condições chegam perto das limite para a via.

Eventualmente a demanda toca a capacidade da via, e então ocorre o *breakdown* (HIGHWAYS AGENCY, 2007); onde há uma drástica redução nas velocidades, podendo chegar a zero antes dos cruzamentos e formam-se as filas (MIZUTA et al., 2014).

Figura 3 - Fenômeno *breakdown*



(fonte: adaptado de CHAUDHARY et al., 2004, p. 6)

### 3.1.2 Objetivos secundários do ramp metering

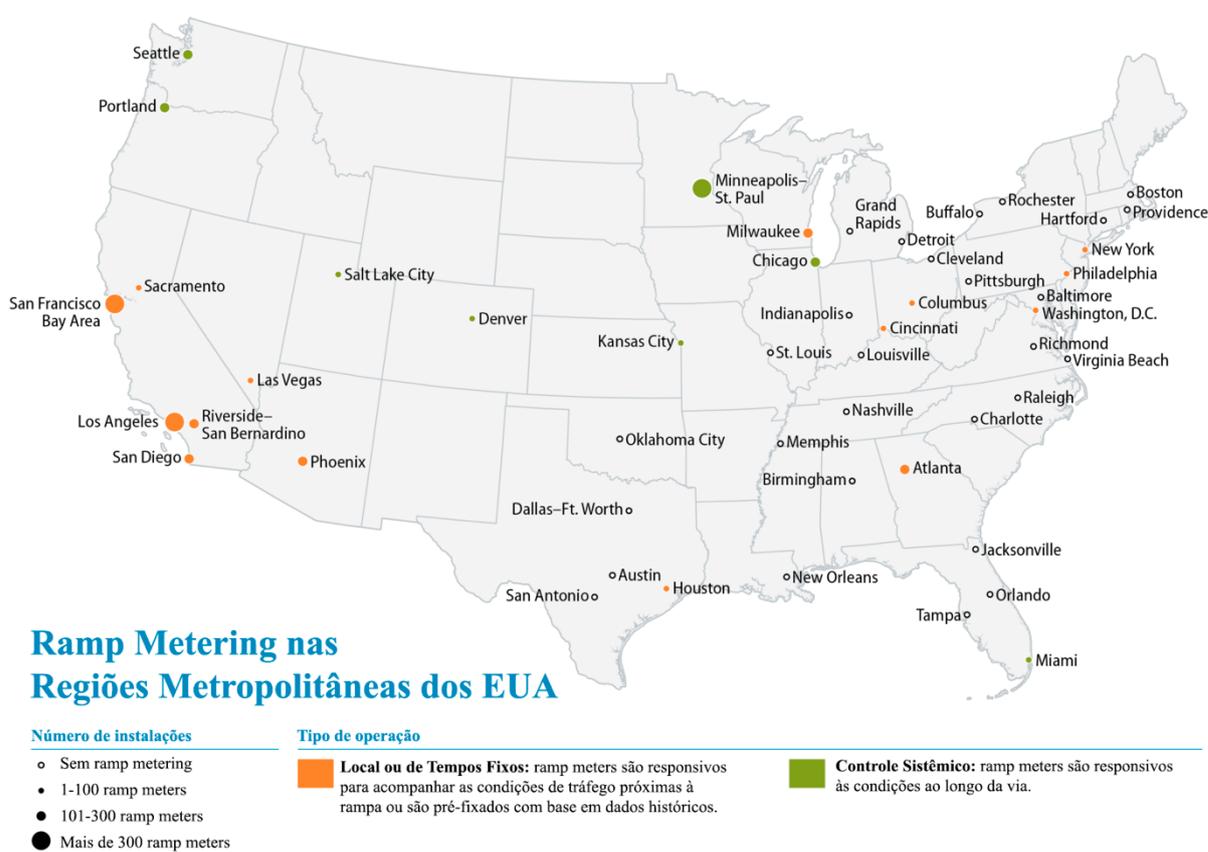
A implementação de *ramp metering* deve ser consistente com os objetivos e necessidades de uma região, os quais não necessariamente são os mesmos em todas as localidades (MIZUTA et al., 2014). Dessa forma, além da diminuição de congestionamentos, podem ser esperados (CHAUDHARY et al., 2004; MIZUTA et al., 2014; SIMPSON; RILEY; UNITED CIVIL GROUP, 2013):

- a) aumento de produtividade da via;
- b) aumento da velocidade média;
- c) aumento da segurança nos entornos das entradas;
- d) redução do consumo de combustíveis e de emissões.

### 3.2 HISTÓRIA E EXPERIÊNCIAS INTERNACIONAIS

A prática do *ramp metering* teve início na Eisenhower Expressway em Chicago, na década de 1960. Os benefícios proporcionados, como aumento de velocidade das vias, redução dos tempos de viagem e de acidentes, logo se tornaram visíveis e nos anos seguintes o método foi aplicado em Detroit, Los Angeles e Minneapolis (MIZUTA et al., 2014). As técnicas avançaram e a prática se tornou recorrente em todos os Estados Unidos, como pode ser observado na Figura 4.

Figura 4 - Mapa do uso de *ramp metering* nos EUA



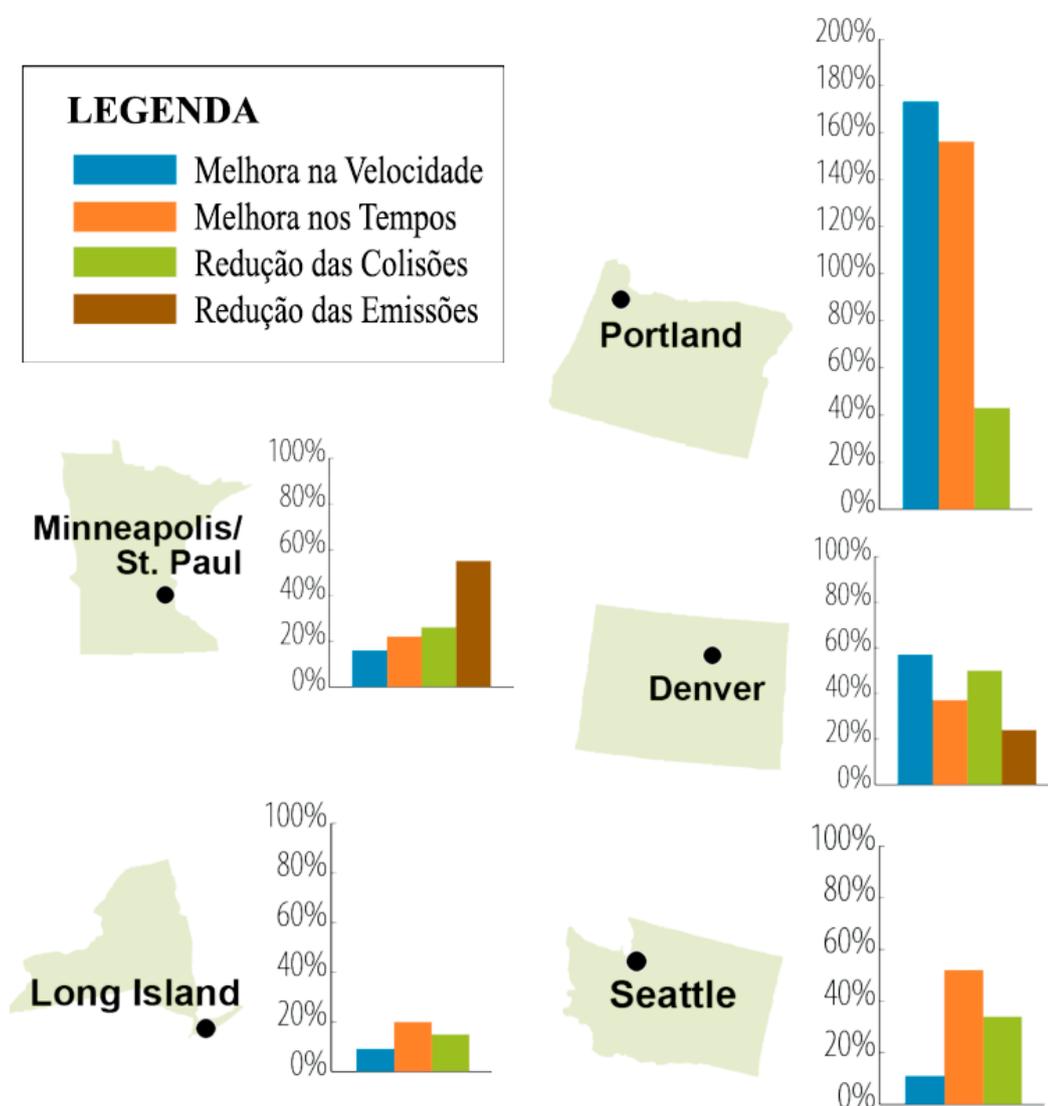
(fonte: adaptado de Mizuta et al., 2014, p. 4)

A partir dos anos 1980 a prática tomou proporções mundiais, sendo adotada na Austrália e difundida na Europa com Alemanha, Bélgica, França, Holanda e Inglaterra. Em 2001 o projeto CENTRICO produziu um relatório com uma compilação das experiências obtidas por esses países e, a partir de então, o método foi aplicado em outros países (HIGHWAYS AGENCY, 2007).

### 3.3 BENEFÍCIOS DO RAMP METERING

Quando bem aplicado e atendendo a exigências específicas de uma região, o *ramp metering* conduz a benefícios bastante efetivos a longo prazo. Apesar de cada localidade buscar atender suas necessidades em particular, observa-se uma série de benefícios comuns à maioria delas, como ilustrado na Figura 5, o que torna o *ramp metering* uma das estratégias de gerenciamento ativo com melhor relação custo/benefício (CAMBRIDGE SYSTEMATICS INCORPORATED, 2001; MIZUTA et al., 2014).

Figura 5 - Benefícios do ramp metering



(fonte: adaptado de Mizuta et al., 2014, p. 5)

## 4 ELEMENTOS DO RAMP METERING

A prática de *ramp metering* oferece grandes benefícios mesmo fazendo uso de poucos elementos, o que contribui para sua disseminação em todo o mundo. Contudo, a boa compreensão do papel de cada um desses componentes é crucial para que se opere com segurança e efetividade (MIZUTA et al., 2014). O sistema é basicamente composto de:

- a) sinalização semafórica: faz a comunicação visual entre o motorista e o sistema, controlando a passagem dos veículos e informando se o sistema está ligado;
- b) sinalização com placas: adverte da existência do sistema e fornece informações sobre a sinalização semafórica, como quantos carros passam por verde e o que significam as luzes dos semáforos.
- c) detectores: responsáveis pela coleta de informações em pontos específicos da rampa de acesso e da via principal;
- d) controlador: faz a interpretação dos dados coletados pelos detectores e altera os tempos semafóricos, fazendo uso de algoritmos específicos.

A sinalização com placas e o controlador são irrelevantes neste estudo por serem indiferentes dentro do ambiente de simulação computacional escolhido e não serão estudados. A sinalização semafórica e os detectores são detalhados nas seções a seguir.

### 4.1 SINALIZAÇÃO SEMAFÓRICA

Segundo o CONTRAN (2014, p. 11), “A sinalização semafórica tem por finalidade transmitir aos usuários a informação sobre o direito de passagem em interseções e/ou seções de via onde o espaço viário é disputado por dois ou mais movimentos conflitantes [...]”. O órgão ressalta que semáforo é “[...] o conjunto obtido pela montagem de um ou mais focos luminosos com suas faces voltadas para o sentido do movimento”.

Também de acordo com o CONTRAN (2014, p. 11), a sinalização semafórica pode ser classificada, segundo sua função, como:

- a) sinalização semafórica de regulamentação – tem a função de efetuar o controle do trânsito numa interseção ou seção de via, através de indicações luminosas, alternando o direito de passagem dos vários fluxos de veículos e/ou pedestres;
- b) sinalização semafórica de advertência – tem a função de advertir sobre a existência de obstáculo ou situação perigosa, devendo o condutor reduzir a

velocidade e adotar as medidas de precaução compatíveis com a segurança para seguir adiante.

#### **4.1.1 Sinalização de passagem**

O CONTRAN não especifica como deve ser a configuração dos semáforos em caso de utilização de *ramp metering*, porém diz que para controle de acesso específico, como praças de pedágios e balsas, o semáforo deve possuir “focos vermelho e verde, dispostos nesta ordem, de cima para baixo quando vertical, e da esquerda para a direita quando horizontal” (CONTRAN, 2014). Essa configuração é amplamente utilizada e recomendada na prática de *ramp metering* (CHAUDHARY et al., 2004; SIMPSON; RILEY; UNITED CIVIL GROUP, 2013).

Devem ser colocados um semáforo para cada faixa utilizada para estoque de fila na rampa de acesso (SIMPSON; RILEY; UNITED CIVIL GROUP, 2013). O ciclo do semáforo varia de acordo com o tipo de operação escolhido, conforme discutido na Seção 5.1.

#### **4.1.2 Sinalização de advertência**

Quanto à sinalização de advertência o CONTRAN (2014, p. 18) recomenda que seja utilizado semáforo com dois focos amarelos intermitentes, piscando a uma frequência de 1Hz. Essa configuração também é respaldada pelos manuais internacionais (CHAUDHARY et al., 2004; SIMPSON; RILEY; UNITED CIVIL GROUP, 2013).

A sinalização de advertência deve ser colocada na entrada da rampa de acesso, com um semáforo para cada faixa de estoque de fila, junto ao detector de acumulação de fila (SIMPSON; RILEY; UNITED CIVIL GROUP, 2013). Esta sinalização tem como objetivo indicar aos motoristas que o sistema de *ramp metering* está ativado.

## **4.2 DETECTORES**

Existe alguma divergência na literatura quanto à disposição, finalidade e quantidade dos detectores, uma vez que cada configuração de *ramp metering* é única e adaptada para uma situação em específico. Essa diferença se dá principalmente quando se compara diferentes

tipos de operação, estratégias e métodos (discutidos no Capítulo 5), já que cada um utiliza informações diferentes para fazer a gestão da prática.

De modo geral, os detectores mais utilizados são os apresentados no quadro a seguir:

Quadro 1 - Tipos de detectores e características

<b>Tipo do detector</b>	<b>Localização/tamanho</b>	<b>Aplicação</b>
Via principal	Localizado na via principal a montante e/ou jusante ao ponto de ingresso da rampa na via.	Fornecer informações de ocupação, velocidade ou volume da via principal, que são utilizados para selecionar a taxa de <i>ramp metering</i> do local.
Cruzamento	Colocado entre a área de cruzamento e a linha de parada da rampa de acesso.	Usado principalmente para fornecer dados de contagem da rampa de acesso. Em alguns casos é utilizado para determinar quando o sistema deve ser ligado e desligado.
Passagem	Posicionado imediatamente a jusante da linha de parada.	Usado em alguns casos para determinar a duração do sinal verde em uma faixa específica.
Demanda	Colocado imediatamente a montante da linha de parada.	Sente a presença de um veículo na linha de parada e inicia o sinal verde para a faixa a qual pertence, de acordo com a estratégia utilizada.
Secundário de fila	Colocado aproximadamente a meia distância entre a linha de parada e a entrada da rampa de acesso.	Gradativamente aumenta a taxa de <i>ramp metering</i> para controlar o a lotação ao longo da distância destinada à fila.
Primário de fila	Posicionado próximo à entrada da rampa de acesso (tipicamente depois de 30 metros).	Monitora filas excessivas que não podem ser armazenadas no espaço destinado para tal. Maximiza a taxa de <i>ramp metering</i> para eliminar filas excessivas.

(fonte: adaptado de CHAUDHARY et al., 2004)

## 5 OPERAÇÃO

Como já mencionado, a prática de *ramp metering* é feita de maneiras diferentes de acordo com a necessidade local. Este capítulo aborda as principais variantes existentes no que concerne a operação do sistema.

### 5.1 TIPOS DE OPERAÇÃO

Quando o cruzamento entre a via principal e rampa de acesso não é um gargalo, a capacidade da rampa fica entorno de 1800 a 2200 (vph) veículos por hora. Fazendo uso de um sistema de *ramp metering*, esse valor será bastante reduzido e a capacidade máxima teórica variará de acordo com o tipo de operação utilizado (CHAUDHARY et al., 2004). Os tipos de operação mais comuns são descritos a seguir (CHAUDHARY et al., 2004).

#### 5.1.1 Uma faixa e um veículo por verde

Este tipo de operação permite que apenas um veículo passe a cada ciclo, de modo que este deve possuir tempo suficiente para haja a passagem pela faixa de parada. O tempo de vermelho deve ser tal que o próximo veículo consiga parar completamente diante da faixa de parada.

Teoricamente, o menor ciclo possível seria o de 4 segundos, com 2 segundos de verde e 2 segundos de vermelho, o que geraria uma taxa de 900vph. Contudo, a experiência mostra que este comprimento de ciclo impede que os veículos consigam parar efetivamente e que qualquer hesitação por parte do motorista pode causar a perda de um ciclo e atrasar o sistema. O valor mais aconselhado é de um ciclo de 4,5 segundos, aumentando o tempo de vermelho para 2,5 segundos, o que resulta em uma taxa de 800vph.

#### 5.1.2 Uma faixa e múltiplos veículos por verde

A prática mais comum dentro deste tipo de operação é permitir que 2 veículos passem por verde. Permitir que mais do que 2 veículos passem por verde implicaria em contrariar um dos objetivos básicos do *ramp metering*, a quebra de pelotões. Além disso, passa a se tornar mais importante o uso de uma fase de amarelo no semáforo para mitigar a indecisão dos motoristas,

e a intensificação da sinalização com placas para indicar o número de veículos que devem passar por verde.

A tabela a seguir sintetiza os valores ideais para este tipo de operação.

Tabela 1 - Tempos recomendados para operação com uma faixa

<b>Tempo do intervalo (segundos)</b>						
<b>Intervalo</b>	<b>Veículos por verde</b>					
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
<b>Vermelho</b>	2,00	2,00	2,32	2,61	2,86	3,08
<b>Amarelo</b>	1,00	1,70	2,00	2,22	2,41	2,58
<b>Verde</b>	1,00	3,37	5,47	7,35	9,13	10,83
<b>Ciclo</b>	4,00	7,08	9,78	12,19	14,40	16,49
<b>Capacidade</b>	900	1017	1104	1181	1250	1310

(fonte: adaptado de CHAUDHARY et al., 2004)

### 5.1.3 Duas faixas

Esse tipo de operação requer duas faixas para ser operado. É colocado um semáforo em cada faixa e o ciclo semafórico é alternado entre eles. Idealmente os ciclos são sincronizados, de modo que a fase verde nunca aconteça nas duas faixas, contudo isto depende o controlador utilizado.

Operações com duas faixas podem operar a uma taxa de até 1700vph, chegando próximo a capacidade geométrica da rampa de acesso. Além disso, o espaço para estocagem é o dobro em relação a operação com uma única faixa.

## 5.2 ESTRATÉGIAS

Cada tipo de operação utiliza uma estratégia que se adequa às suas necessidades, sendo que, como citado na Seção 3.2, existem várias propostas em todo o mundo. Dentre as mais utilizadas, as três principais são de tempos fixos, locais e sistêmicas (MIZUTA et al., 2014).

Nesta seção serão abordados os aspectos fundamentais de cada uma delas e também os algoritmos mais usuais.

### 5.2.1 Estratégias de tempo fixo

Tempos fixos são utilizados em situações bastante controladas, onde se dispõe de dados históricos concretos e estáveis e onde o investimento deve ser menor (FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION, 2014). É a estratégia mais barata, operacionalmente confiável e simples de se aplicar, pois não necessita que sejam instalados detectores e aparelhos de transmissão para o controle central (MIZUTA et al., 2014). Contudo, esta estratégia é mais rígida, impossibilitando a alteração das taxas de *ramp metering* em tempo real de acordo com as condições da via, não sendo necessariamente a mais eficiente em algumas situações (MIZUTA et al., 2014).

### 5.2.2 Estratégias locais

Estratégias locais utilizam dados advindos apenas de detectores posicionados na própria interseção para mitigar congestionamentos localizados, não levando em conta a condição ao longo da via. Em locais onde é aplicada uma estratégia sistêmica, o controle local também é utilizado como *back-up* em caso de falhas (MIZUTA et al., 2014)

### 5.2.3 Estratégias sistêmicas

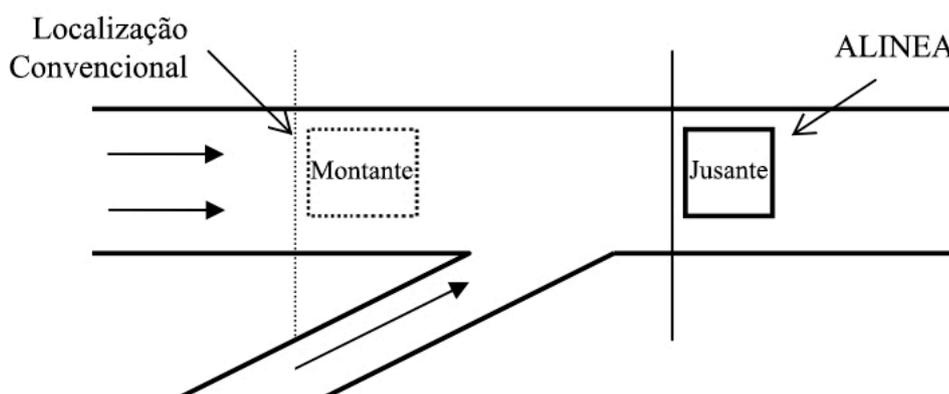
Estratégias sistêmicas admitem que existam vários pontos de *ramp metering* na mesma via e que as taxas utilizadas em cada um deles varie de forma a maximizar o fluxo local e globalmente (CHAUDHARY et al., 2004). Segundo Mizuta et al. (2014, pg. 10), esta estratégia “ [...]oferece mais opções para maximizar o fluxo da via principal e os atrasos totais utilizando múltiplas rampas para controlar o tráfego em um certo gargalo ou região congestionada”.

## 5.3 ALGORITMO ALINEA

Muitos algoritmos tem sido sugeridos para a implementação de *ramp metering* desde sua difusão (CHAUDHARY et al., 2004), sendo que um dos mais utilizados é o ALINEA

(Asservissement Linéaire d'Entrée Autoroutiere), o qual será instrumento deste estudo. Este algoritmo propõe maximizar o fluxo de uma via mantendo sua ocupação em um nível desejável (PAPAGEORGIU; HADJ-SALEM; MIDDELHAM, 1997). O ALINEA é alimentado por dados de ocupação coletados por detectores instalados na via principal a jusante da interseção, adotando uma filosofia de *feedback*. Isso o difere da maior parte dos demais algoritmos, os quais posicionam os detectores a montante da interseção – uma filosofia *feedforward*. Essa característica torna este algoritmo muito menos sensível a distorções e à variabilidade dos dados coletados (HADJ-SALEM; BLOSSEVILLE; PAPAGEORGIU, 1990). A Figura 6 ilustra o posicionamento dos detectores utilizados nessa estratégia e onde os demais algoritmos costumam os posicionar.

Figura 6 - Detectores para o algoritmo ALINEA



(fonte: adaptado de CHAUDHARY, 2004, pg. 14)

ALINEA utiliza a seguinte equação para se encontrar a taxa de *ramp metering* em um tempo  $t$ :

$$r(t) = r(t - 1) + K_r [O - O_{out}(t)] \quad (\text{equação 1})$$

Onde:

$O$  = limite de ocupação desejado;

$O_{out}(t)$  = ocupação medida no tempo  $t$ ;

$r(t-1)$  = taxa de *ramp metering* no período de tempo anterior;

$K_r$  = fator regulador

Os desenvolvedores do ALINEA sugerem que o fator  $K_r$  seja de 70vph, devendo ser definido através de calibração. Eles também relatam casos de sucesso onde a alteração da taxa de *ramp metering* foi de 60 segundos, o que deve condizer com o tempo que os veículos levam para atravessar a faixa de parada e passar pelos detectores da via principal. A ocupação desejada tem sido usada com valores entre 18% e 30% (CHAUDHARY, 2004 apud PAPAGEORGIOU, 1991).

### 5.3.1 Outros algoritmos

Muitos outros algoritmos também têm sido desenvolvidos (CHAUDHARY, 2004 apud ZHANG, 2001). Eles incluem:

- a) Bottleneck: proporciona controle local e sistêmico em uma seção de via. O controle local é feito com base na demanda e na capacidade da via, e o sistêmico com base na capacidade do sistema, redistribuindo o fluxo das rampas de modo a maximizar o sistema (CHAUDHARY, 2004 apud CHU, 2002; ZHANG, 2001; JACOBSON, 1989);
- b) RAMBO: faz a gestão do sistema de *ramp metering* baseado em condições de tráfego já conhecidas, estudadas através da formulação e otimização de um modelo de programação linear (CHAUDHARY, 2004 apud MESSER, 1994);
- c) ZONE: divide a via em zonas e calcula a taxa de *ramp metering* para cada uma delas com base no controle dos seus volumes;
- d) SWARM: opera em nível local e sistêmico. Identifica gargalos baseado em condições de tráfego previstas. Sua eficiência depende da qualidade das previsões;
- e) MALINEA: ALINEA modificado, é um algoritmo local;
- f) METLINE: extensão do ALINEA para um controle sistêmico de um grupo de rampas de acesso;
- g) Sistemas coordenados baseados em lógicas *fuzzy* e redes neurais;
- h) ARMS: contém algoritmos para controle local e sistêmico.

## 5.4 QUESTÕES LOCAIS A SE CONSIDERAR

A ativação do sistema e a estratégia utilizada para a prática de *ramp metering* também dependem dos problemas enfrentados na localidade onde se estuda implantá-lo. Práticas frequentemente promovidas para enfrentar estes problemas são (CHAUDHARY et al., 2004; HIGHWAYS AGENCY, 2007):

- a) período do dia: visa acionar o sistema em momentos predeterminados do dia, quando se sabe que a localidade possui problemas de congestionamento devido a demanda de veículos. Como as demandas são conhecidas e a variabilidade é pequena, geralmente se utiliza tempos fixos de *ramp metering* e acionamento automático.
- b) incidente/evento especial: aplicada em situações onde a demanda é diferenciada devido a eventos como shows, praticas esportivas, feriados ou a via pode ser amplamente afetada com a ocorrência de incidentes. É acionado manualmente e geralmente utilizado com estratégias responsivas à demanda.
- c) puramente responsivo à demanda: esta ação visa maximizar a taxa de *ramp metering* e permanece ativado integralmente. Em alguns casos se utiliza estratégias de tempo fixo com acionamento automático de acordo com a demanda, mas o mais usual é a utilização de estratégias responsivas para ajuste da taxa de *ramp metering* e para o desligamento do sistema nos momentos em que ele é desnecessário.

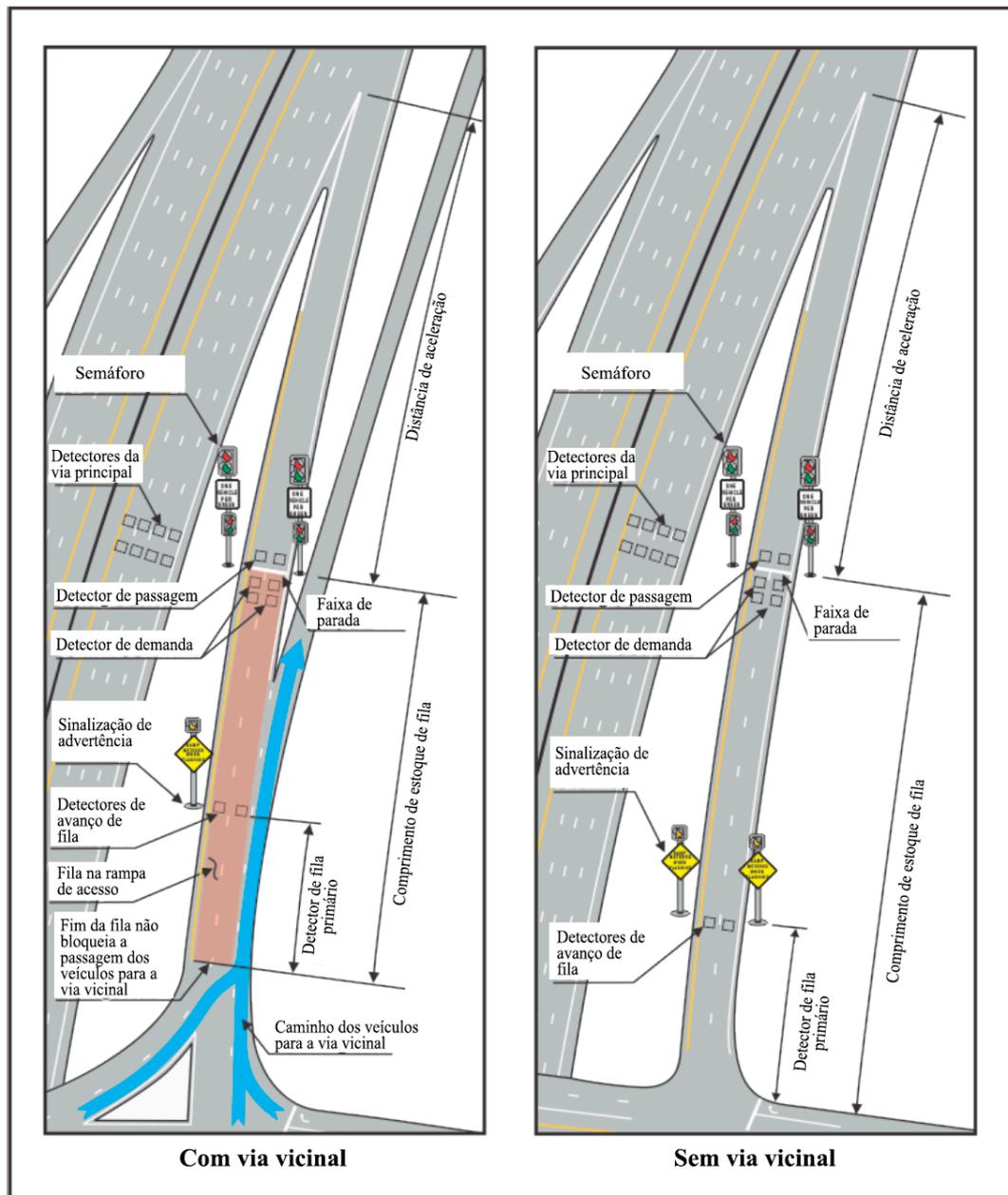
Além disso estas práticas podem possuir as seguintes características (CHAUDHARY et al., 2004):

- a) restritivas e não-restritivas: praticas restritivas impedem que as taxas de *ramp metering* sejam superiores à situação onde a prática não é aplicada. Esta prática geralmente alcança os benefícios propostos porém pode gerar filas excessivas e deve ser estudado cautelosamente. Práticas não-restritivas permitem que a taxa seja igual à da situação sem *ramp metering* e ainda contam com o benefício da quebra de pelotões.
- b) eliminação de fila: opcional, esta prática pode ser utilizada com qualquer tipo de *ramp metering*. Junto de práticas mais restritivas ela pode ser utilizada alterando-se a taxa para a máxima admitida até que a fila se dissipe. Em práticas menos restritivas o sistema pode ser desligado até que a fila seja eliminada. Esta medida deve ser estudada com cuidado, pois verificou-se que em casos onde era recorrente, o efeito benéfico do *ramp metering* foi eliminado.

## 6 GEOMETRIA

Para que se possa alcançar os resultados almejados, a instalação do *ramp metering* precisa garantir que alguns critérios de geometria sejam atendidos, de modo a oferecer uma operação segura, eficiente e desejável (CHAUDHARY et al., 2004). Este capítulo visa discutir cada um destes aspectos. A figura a seguir ilustra os parâmetros de geometria.

Figura 7 - Geometria do ramp metering



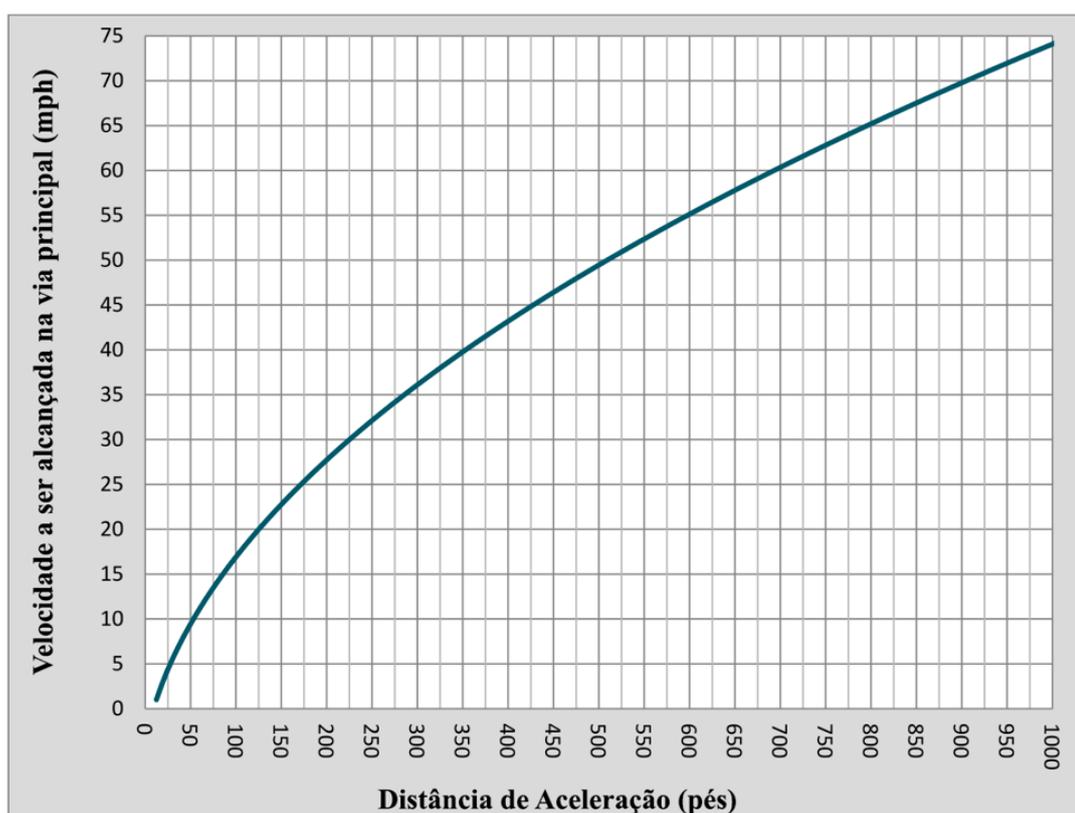
(fonte: adaptado de SIMPSON; RILEY; UNITED CIVIL GROUP, 2013, pg. 10)

## 6.1 DISTÂNCIA DE ACELERAÇÃO

A distância de aceleração é a distância entre a faixa de parada e o cruzamento da rampa de acesso com a via principal. Ela deve ser calculada de modo a permitir que os veículos parados na faixa de parada consigam desenvolver velocidades seguras e adequadas para ingressarem no fluxo da via principal (SIMPSON; RILEY; UNITED CIVIL GROUP, 2013). Observar a Figura 8 para descrição gráfica.

Recomenda-se o uso de 85% da velocidade de fluxo livre da via principal para o cálculo da distância de aceleração (ADOT, 2015). O gráfico a seguir relaciona a velocidade de imersão dos veículos e a distância de aceleração.

Figura 8 - Distância de aceleração



(fonte: adaptado de SIMPSON; RILEY; UNITED CIVIL GROUP, 2013, pg. 6)

Quando o grade da rampa de acesso a jusante da faixa de parada for maior que 1%, deve-se acrescentar ao comprimento de aceleração o valor calculado por (SIMPSON; RILEY; UNITED CIVIL GROUP, 2013):

$$\Delta L_{grade} = G \times 20 \quad (\text{equação 2})$$

Onde:

$\Delta L_{grade}$  = comprimento adicional devido à inclinação do grade (m);

G = valor do grade da rampa de acesso depois da faixa de parada expresso em percentual.

Quando o percentual de veículos pesados na rampa de acesso for maior do que 3%, deve-se acrescentar a distância de aceleração o valor calculado por (SIMPSON; RILEY; UNITED CIVIL GROUP, 2013):

$$\Delta L_{veic.pesados} = (T - 3) \times 30 \quad (\text{equação 3})$$

Onde:

$\Delta L_{veic.pesados}$  = comprimento adicional devido ao número de veículos pesados (m);

T = valor do percentual de veículos pesados na rampa de acesso.

## 6.2 DISTÂNCIA DE ESTOQUE DE FILA

Esta distância deve ser oferecida para que a fila formada pelo *ramp metering* não interfira no tráfego das vias a montante e de eventuais vias vicinais que também derivem desta mesma rampa (CHAUDHARY et al., 2004; SIMPSON; RILEY; UNITED CIVIL GROUP, 2013).

Se a via vicinal não estiver presente, a distância de estoque de fila é medida da faixa de parada até a borda da via a montante. Se a vicinal estiver presente, esta distância é medida da faixa de parada até o ponto onde fila na rampa bloquearia o caminho de um veículo que desejasse acessar a vicinal. Observar a Figura 7 para descrição gráfica.

A distância de estoque de fila é calculada da seguinte maneira (SIMPSON; RILEY; UNITED CIVIL GROUP, 2013):

$$Fila = 3,28 \frac{(Volume_{rampa} - Volume_{meter}) * Tempo * (L_{carro} (1 - \frac{T}{100}) + L_{caminhão} (\frac{T}{100}))}{Faixas} \quad (\text{equação 4})$$

Onde:

Fila = distância de estoque de fila (m);

Volume<sub>rampa</sub> = Volume de veículos de projeto que ingressa na rampa (vph). Deve ser feita uma previsão de 20 anos de demanda;

Volume<sub>meter</sub> = Taxa de *ramp metering* de projeto (vph). O valor típico é de 840vph;

Tempo = Tempo de projeto em que o sistema funciona com a taxa de projeto (horas). O valor típico é de 0,5h;

L<sub>carro</sub> = Comprimento médio dos carros mais *gap* (m/veículo). 8,5m/veículo é o valor típico quando a velocidade é inferior a 8km/h;

L<sub>caminhão</sub> = Comprimento médio dos caminhões mais *gap* (m/veículo). 23m/veículo é o valor típico quando o tráfego é lento;

T = Percentual de caminhões da rampa de acesso. O valor típico é de 2%, a menos que sejam feitas medições;

Faixas = Número de faixas com *ramp metering*.

As seguintes equações fornecem as distâncias de estoque de filas para os valores típicos citados acima, exceto o da taxa de *ramp metering*. Independente do caso, um valor mínimo de 120m deve ser respeitado (SIMPSON; RILEY; UNITED CIVIL GROUP, 2013).

$$Fila_{1\ faixa} = 4,5 * Taxa_{meter} - 3700 \quad (\text{equação 5})$$

$$Fila_{2\ faixas} = 2,25 * Taxa_{meter} - 1850 \quad (\text{equação 6})$$

### 6.3 POSIÇÃO DA FAIXA DE PARADA

A faixa de parada divide a rampa de acesso em dois segmentos: aceleração (após a parada) e estoque de fila (antes da parada) (SIMPSON; RILEY; UNITED CIVIL GROUP, 2013).

Se ambas as distâncias puderem ser satisfeitas, pode-se adicionar o comprimento restante da rampa para qualquer uma das duas distâncias, dando preferência ao estoque de fila. Quando alguma dessas distâncias não puder ser executada com a geometria existente, medidas o alargamento da via e do comprimento da entrada da rampa, mudança nas marcações do pavimento e ponderação entre o uso de uma ou duas faixas de *ramp metering* devem ser levadas conta (SIMPSON; RILEY; UNITED CIVIL GROUP, 2013). Em caso de as mudanças não serem possíveis ou suficientes para oferecer as distâncias adequadas, as seguintes medidas podem ser adotadas (SIMPSON; RILEY; UNITED CIVIL GROUP, 2013):

- a) Posicionar a faixa de parada de modo a garantir a distância de aceleração e garantir através da programação do *ramp metering* que serão tomadas medidas para prevenir que a fila se estenda às vias a montante;
- b) Quando o cruzamento da rampa de acesso com a via principal se dá através de um *taper* ou de uma faixa auxiliar, pode-se considerar que até 60 metros deste sirvam como distância de aceleração adicional;
- c) Em casos onde a distância de aceleração não for suficiente, podem ser feitas mudanças na programação do *ramp metering* de modo que o sistema seja desativado quando a velocidade dos veículos que trafegam na faixa da direita na via principal exceder a velocidade que os veículos da rampa conseguem desenvolver. Esta velocidade pode ser determinada utilizando a Figura 8 e a distância reduzida.

## 7 IMPLEMENTAÇÃO

Segundo Neudorff (2003, pg. 7-16), a implementação de um sistema de *ramp metering* é “[...] um processo delicado que começa muito antes de as estratégias serem fisicamente implantadas, e conclui-se apenas depois de as estratégias desenvolvidas terem sido testadas com sucesso e as operações terem sido iniciadas”.

A coerência na adoção do sistema para a localidade deve ser analisada e, junto de todo o processo de implementação, a população deve ser consultada, alertada e informada, uma vez que o *ramp metering* é uma medida contra-intuitiva para a maior parte da população (CHAUDHARY et al., 2004; FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION, 2014; HIGHWAYS AGENCY, 2007; MIZUTA et al., 2014; NEUDORFF et al., 2003; SIMPSON; RILEY; UNITED CIVIL GROUP, 2013).

Segundo MIZUTA (2014, pg. 14), para considerar a implementação de *ramp metering*, “[...] a agência reguladora da via precisa possuir amplo conhecimento dos objetivos gerais da região e da própria agência, tanto no curto quanto no longo prazo”.

### 7.1 ESCOLHA DO LOCAL

A escolha do local depende principalmente dos volumes envolvidos nos encontros, também levando em conta a geometria das vias existentes e a topografia do local (HIGHWAYS AGENCY, 2007). A seguinte tabela foi desenvolvida para o auxílio na implementação de *ramp metering* com base em esquemas já existentes da prática:

Tabela 2 - Recomendações para escolha de local de implementação

Parâmetro	Valor Mínimo		Valor Máximo	
	Ideal	Aceitável	Ideal	Aceitável
Velocidade média na via principal na região do acesso (km/h)	Sem valor mínimo		70	
<i>Delay</i> anual com velocidades inferiores a 50km/h	10.000 veículos.hora	100 horas com velocidade média menor que 50 km/h	Sem valor máximo	
Volume na via (principal por faixa a jusante do acesso (vph)	1.500	Aceitável com base no conhecimento local sobre a via	Sem valor máximo	
Volume no acesso por faixa (vph)	400	300	900	1.250
Volume no acesso em relação ao da via principal (%)	10	5	30	50

(fonte: adaptado de HIGHWAYS AGENCY, 2007, pg. 5-19)

## 8 SIMULAÇÃO

Segundo Mizuta et al. (2014),

Modelos computacionais podem contribuir na determinação do algoritmo mais propício para se lidar com congestionamentos baseado em dados de entrada fornecidos pelo operador da simulação. Simulações computacionais podem estimar uma série de medições, como tempo de viagem, em uma certa via. As simulações podem utilizar novas estratégias operacionais diretamente no programa, de modo que ambientes realísticos podem ser criados e utilizados para mitigar problemas de congestionamento.

Nesta seção são discutidos os aspectos fundamentais que envolvem a simulação computacional do caso em estudo.

### 8.1 SIMULADOR VISSIM

VISSIM é um *software* de simulação de tráfego de escala microscópica que permite criar cenários de trânsito complexos e fazer múltiplas análises, permitindo tanto o acompanhamento da simulação com visualização bidimensional e tridimensional quanto geração de dados para análises externas, como tempos de viagem e comprimento de filas. O *software* utiliza o modelo psico-físico desenvolvido por Wiedemann (1974) para reproduzir o comportamento dos motoristas, baseando-se em distribuições estocásticas de velocidade e distância entre veículos para replicar as características individuais dos motoristas.

Apesar de o idealizador do algoritmo ALINEA utilizar o modelo macroscópico de simulação METANET (MESSNER; PAPAGEORGIOU, 1990) do qual também é autor, muitos estudos já foram conduzidos com sucesso utilizando o simulador VISSIM, como nos de Chang (2007) e Abdelfatah (2012).

### 8.2 MODELO UTILIZADO

O modelo utilizado representa um trecho genérico de rodovia com canteiro central separando os dois sentidos de tráfego e 4 faixas por sentido e a rampa de acesso possui apenas uma faixa e não possui cruzamentos a montante. O modelo foi construído utilizando os princípios das estratégias locais, fazendo uso do algoritmo ALINEA e simulado no *software* PTV VISSIM.

### 8.2.1 Aspectos geométricos

Os aspectos geométricos foram considerados e calculados com base no exposto no Capítulo 6. Modelou-se um sentido de um trecho plano de rodovia genérica com 5km de extensão e 4 faixas com uma rampa de acesso de 1km e uma faixa interceptando a rodovia no centro do trecho. De acordo com o aconselhado no manual da AASHTO, utilizou-se um *taper* na região do *ramp metering* com 250m de comprimento.

Através da Figura 8 calculou-se a distância de aceleração. Os estudos de Caleffi, Moisan e Cybis (2016) apontam que a velocidade de fluxo livre do local utilizado para calibração do modelo é de aproximadamente 90km/h. Inserindo-se no gráfico 85% deste valor, obtém-se uma distância de aceleração de 150m. Não se mostrou necessário considerar os comprimentos adicionais.

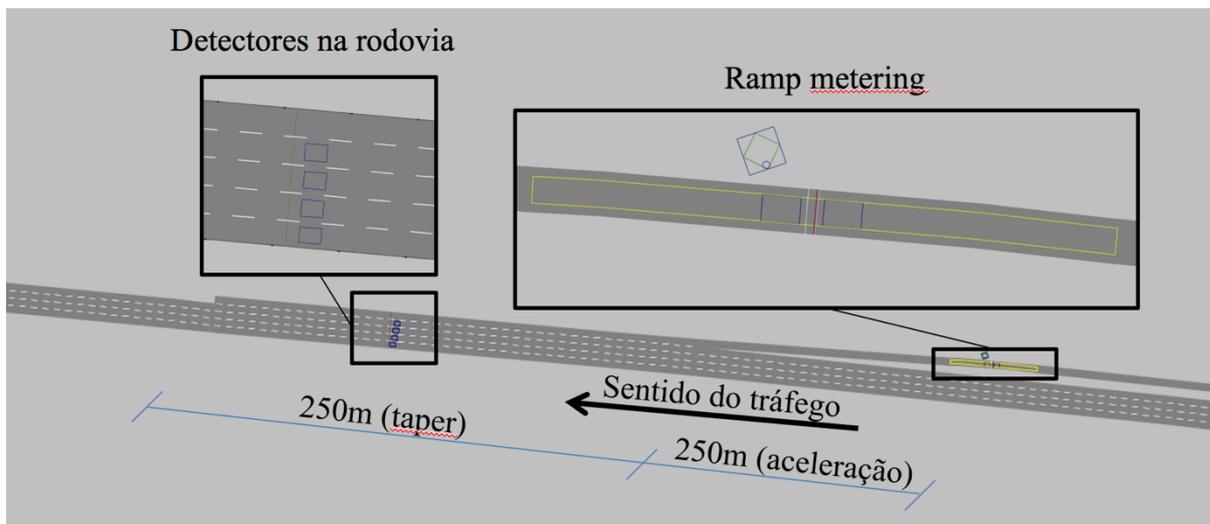
Através da Fórmula 5 calculou-se a distância de estoque de fila. Considerando-se uma taxa de *ramp metering* de 900vph obtém-se valor negativo, adotando-se o valor mínimo de 120m.

Os detectores foram instalados na rodovia a uma distância do semáforo de *ramp metering* a uma distância tal que permitisse o ingresso dos veículos advindos da rampa de acesso. Os veículos devem percorrer esta distância em um tempo inferior ao dos ciclos de avaliação de *ramp metering* presentes no algoritmo ALINEA, de modo que utilizou-se 20s neste estudo. Também foram instalados os detectores de presença e passagem junto ao semáforo e de contagem de veículos em fila ao longo da rampa de acesso.

Também foram inseridos coletores de dados junto aos detectores na via principal para que fosse feita a coleta de velocidades, volumes e número de trocas de faixa, e medidores de tempo de viagem ao longo de todo o trecho da rodovia e da faixa de parada a 500m a montante na rampa de acesso.

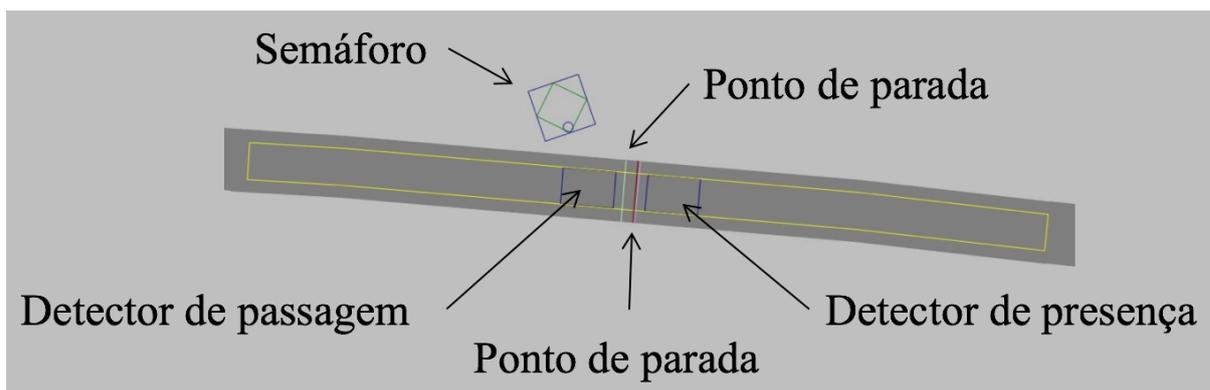
As figuras a seguir foram extraídas do simulador utilizado e ilustram os aspectos geométricos utilizados. O trecho como um todo foi omitido pois não contribui com detalhamento.

Figura 9 - Modelo geométrico



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 10 - Detalhamento da região do semáforo

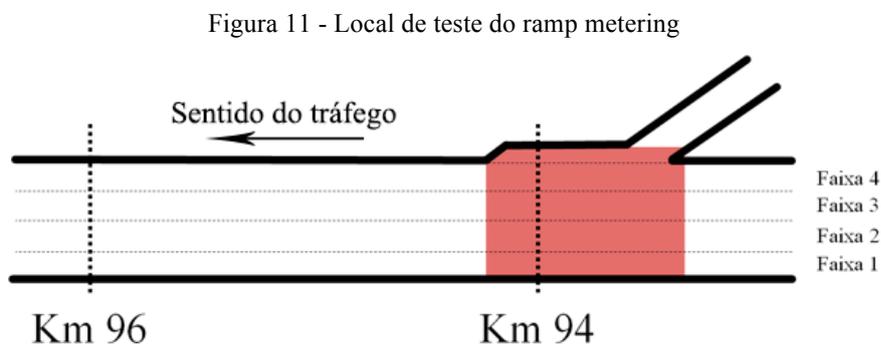


(fonte: elaborado pelo autor)

### 8.3 CALIBRAÇÃO DO MODELO

O trecho criado utiliza a calibração feita em um trecho situado entre os marcos quilométricos 92 e 96, na região metropolitana de Porto Alegre. Esta autoestrada é operada pela concessionária da Rodovia Osório Porto Alegre S/A - CONCEPA. Neste trecho, a rodovia possui quatro faixas de rolamento. Os limites de velocidade no trecho são de 100 km/h para veículos leves e 80 km/h para veículos pesados. Contadores automáticos instalados no trecho permitiram realizar uma caracterização das condições operacionais do segmento em estudo. Estes dados são importantes para a calibração do simulador de tráfego responsável pela modelagem da estratégia de *ramp metering*. Durante dias úteis da semana, este trecho opera com volumes atingindo a capacidade no pico da manhã, no período das 08:00 e 09:30 horas.

A Figura 3 apresenta o trecho em estudo, com destaque para o local de teste do *ramp metering*.



(fonte: elaborado pelo autor)

A calibração dos parâmetros de tráfego foi feita segundo os estudos desenvolvidos por Caleffi, Moisan e Cybis (2016), quando foram estudadas outras medidas de gerenciamento ativo de tráfego para a mesma região. Neste estudo, o modelo foi codificado e calibrado para apresentar resultados razoáveis e realistas. Para isso, um processo de calibração envolvendo os parâmetros de comportamento dos condutores do VISSIM foi desenvolvido para garantir uma boa correlação entre os dados simulados e os dados de fluxo e velocidade coletados através de contadores automáticos presentes no km 96. Primeiramente, o modelo foi calibrado para garantir que a simulação representasse satisfatoriamente as distribuições de fluxo e velocidade, assim como a composição do tráfego. Testes de Qui-quadrado demonstraram que as diferenças entre as distribuições de fluxo e velocidades observadas no campo e nos modelos de simulação não foram estatisticamente significativas. A relação fluxo-velocidade foi escolhida porque os parâmetros habituais utilizados em procedimentos de calibração, tais como o tempo de viagem, não estavam disponíveis.

Para simplificar o processo de calibração, uma análise de sensibilidade foi conduzida para determinar os parâmetros mais importantes e que possuem maior influência no modelo. Vinte e cinco parâmetros comportamentais de *car-following* e *lane-changing* foram considerados nesta análise. Para cada parâmetro, uma gama de 5 valores, incluindo o *default*, foram avaliados. O tempo médio de viagem para a rede modelada foi usada como medida para determinar quais os parâmetros apresentam influência no modelo. Dentro os modelos utilizados pelo *software*, utilizou-se o de Wiedemann (1974), tanto para calibração como para simulação. Cada parâmetro foi simulado individualmente por uma hora (com 3 *random*

*seeds*), enquanto os demais parâmetros foram mantidos com seus parâmetros *default*. Os parâmetros mais importantes, calibrados para o modelo de Wiedemann (74), foram: CC0 (*Standstill distance*), CC1 (*headway time*), CC2 (*Following variation*), CC3 (*Threshold of entering following*), CC4 & CC5 (*negative and positive following thresholds*) e “*Safety distance reduction factor*”. Uma maior descrição destes parâmetros pode ser encontrada em (PTV, 2014).

Após a análise de sensibilidade, o modelo foi calibrado usando uma análise combinatória apenas com os parâmetros influentes no modelo. Novamente uma gama de valores para cada parâmetro foi usada, baseado em estudos prévios e experiência adquirida. O parâmetro CC0 é definido como a distância desejada entre veículos parados, e foi medida em campo através de análises de vídeo. 6480 rodadas de simulação foram executadas (5 parâmetros x 3 *random seeds*) na análise combinatória. Os valores que melhor representam cada parâmetro são: (CC0 = 1,4); (CC1 = 1,1); (CC2 = 2,6); (CC3 = -5,5); CC4 & CC5 =  $\pm 0,5$ ); e (*Safety distance reduction factor* = 0,3). Para essa combinação, o erro médio relativo entre a relação fluxo-velocidade simulada e a medida em campo foi de 1,09%.

### 8.3.1 Modelagem do ramp metering

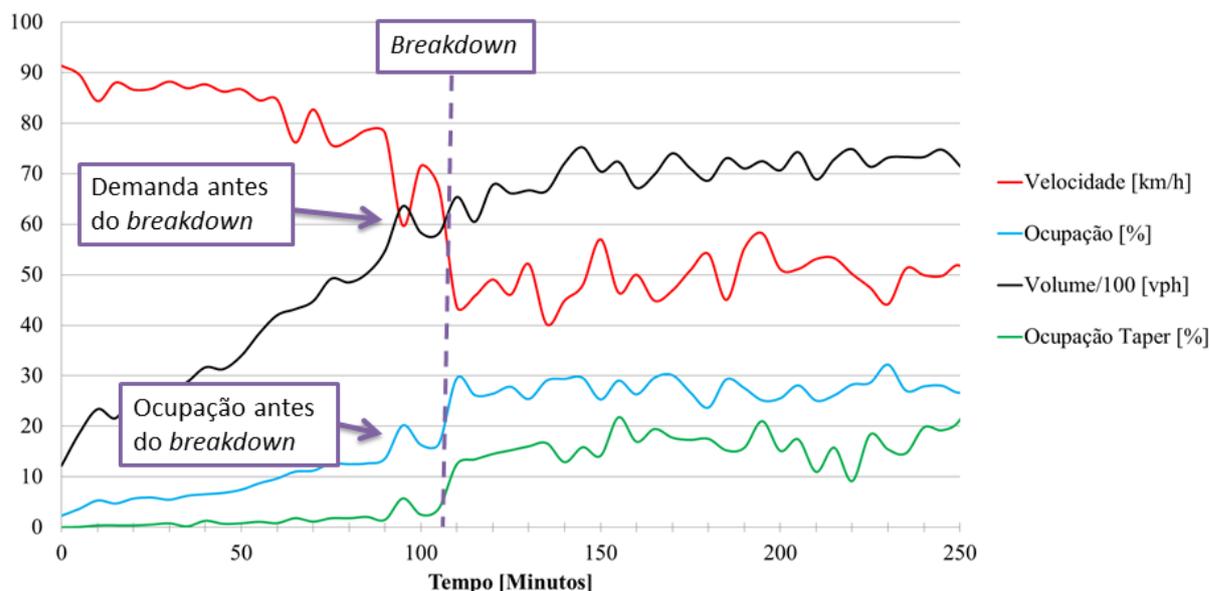
O VISSIM fornece ferramentas que possibilitam implementar estratégias de gerenciamento ativo de tráfego no modelo de simulação, como o *vehicle actuated programming* (VAP) (PTV, 2014). O VAP é uma ferramenta de programação que possibilitou a simulação da estratégia de controle do *ramp metering* em resposta às condições do tráfego em tempo real. O código utilizado foi adaptado de Chaudhary (2004), e é apresentado no Anexo A.

Uma avaliação do comportamento do tráfego foi realizada no VISSIM para caracterizar períodos de *breakdown*. Essa avaliação foi realizada para determinar patamares de volume e ocupação da rodovia que precedem os colapsos no fluxo. Esta caracterização é importante, pois o algoritmo ALINEA buscará manter estas condições, com o objetivo de evitar ou retardar estes *breakdowns*.

A Figura 4 ilustra os patamares críticos de volume, ocupação e velocidade coletados. Para esta modelagem, a demanda foi variada de maneira crescente até que atingisse a capacidade da via e não se aplicou nenhuma estratégia de gerenciamento ativo. Os detectores

responsáveis pela coleta de dados foram colocados a jusante da área de *merging*, conforme indica Elefteriadou (2014).

Figura 12 - Patamares críticos de volume, ocupação e velocidade, para o km 94 no VISSIM



(fonte: elaborado pelo autor)

A ocupação lida pelo algoritmo é a média entre a ocupação de cada faixa. Não foi instalado laço indutivo no *taper* uma vez que este produziria valores de ocupação não condizentes com os das demais faixas. Isso decorre do fato de que os veículos trafegam com uma velocidade menor no *taper* e o tráfego apresenta uma menor densidade por existir o *ramp metering* a montante.

O patamar crítico que precede o *breakdown* é de 6000 vph. Para valores acima deste volume, acontecem quedas bruscas de velocidade e, conseqüentemente, um aumento da ocupação média. A ocupação crítica é a ocupação que precede o *breakdown*, e corresponde, em uma análise visual, a 19%. Este valor é utilizado como referência para o restante da otimização.

Foram desenvolvidos quatro cenários de simulação entorno da ocupação crítica de 19% (Ocr 15%, Ocr 17%, Ocr 19% e Ocr 21%) e um cenário controle sem *ramp metering* a serem comparados utilizando-se a mesma semente. O objetivo desta etapa é determinar o valor de ocupação crítica que melhor regula a taxa de entrada de veículos na rodovia. Outros valores de parâmetros do algoritmo ALINEA foram:  $K_r = 70$  vph; intervalo de atualização do algoritmo de 20 segundos; taxa máxima de *ramp metering* de 900 vph; taxa mínima de *ramp*

*metering* de 240 vph e tempo de verde = 2s. Essas taxas são empregadas, pois correspondem ao ciclo mínimo de 4 segundos e ciclo máximo de 15 segundos, como indicados em Chaudhary et al. (2004). Na implementação do algoritmo não foi considerado um valor limite de fila, o que usualmente é empregado na prática. Isso foi feito para avaliar o impacto que as filas podem ter no modelo em análise, e conhecer o tamanho máximo de fila gerado pelo cenário modelado.

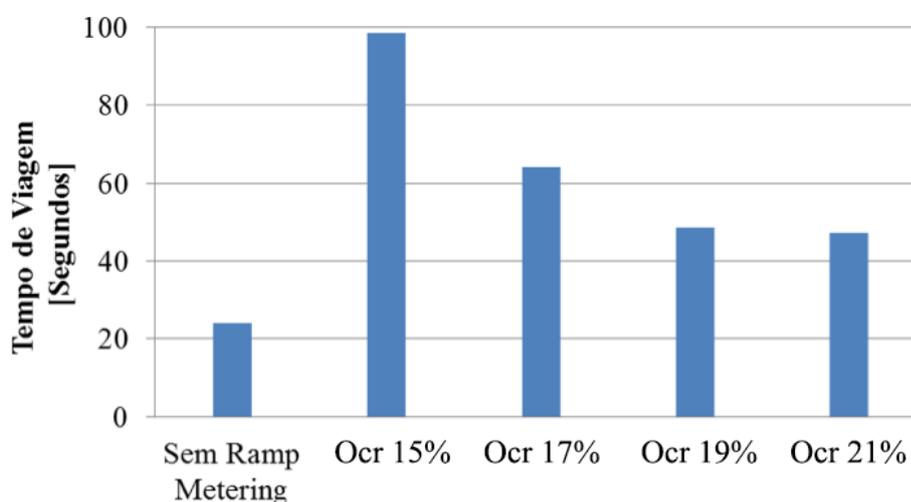
A demanda para o cenário avaliado foi de 4140 vph na rodovia (4 faixas de tráfego), o que corresponde a 69% do volume médio que antecede o *breakdown*. A demanda oriunda da rampa de acesso é de 720 vph, que corresponde a 80% da taxa máxima de *ramp metering* admissível para uma faixa de tráfego. De acordo com Chaudhary et al. (2004), este é um cenário de demanda intermediária para a rodovia e para a rampa de acesso. A modelagem teve um período de três horas, onde as demandas mencionadas foram mantidas constantes.

## 9 RESULTADOS

### 9.1 DESEMPENHO DO TRÁFEGO NA RAMPA DE ACESSO

Foram mensurados na rampa de acesso os comprimentos de fila média e máxima, bem como o tempo de viagem médio. Esse tempo de viagem foi medido para um trecho de 500 metros a montante do semáforo de *ramp metering*. A Figura 13 apresenta os valores medidos para os diferentes cenários de ocupação crítica modelados com o algoritmo ALINEA.

Figura 13 - Tempo de viagem médio na rampa de acesso

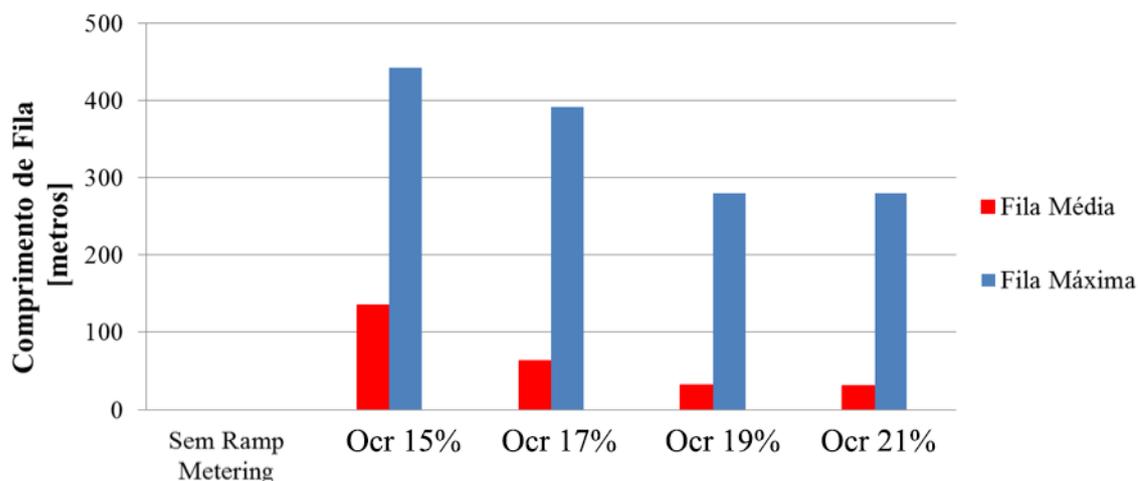


(fonte: elaborado pelo autor)

Como esperado, o tempo de viagem sem a estratégia de *ramp metering* é inferior, uma vez que sem o semáforo os veículos possuem passagem livre na rampa. Nota-se diferença nos tempos de viagem para os cenários testados com o ALINEA, evidenciando a importância da identificação do valor crítico de ocupação. A literatura indica que o tempo de viagem na rampa seja inferior a 120 segundos (Chaudhary et al., 2004), consequentemente os valores obtidos são aceitáveis.

O *software* VISSIM permite que se avalie o comprimento das filas ao longo do tempo. A análise dos dados de saída aponta que o cenário "Ocr 19%" gerou o menor comprimento de filas.

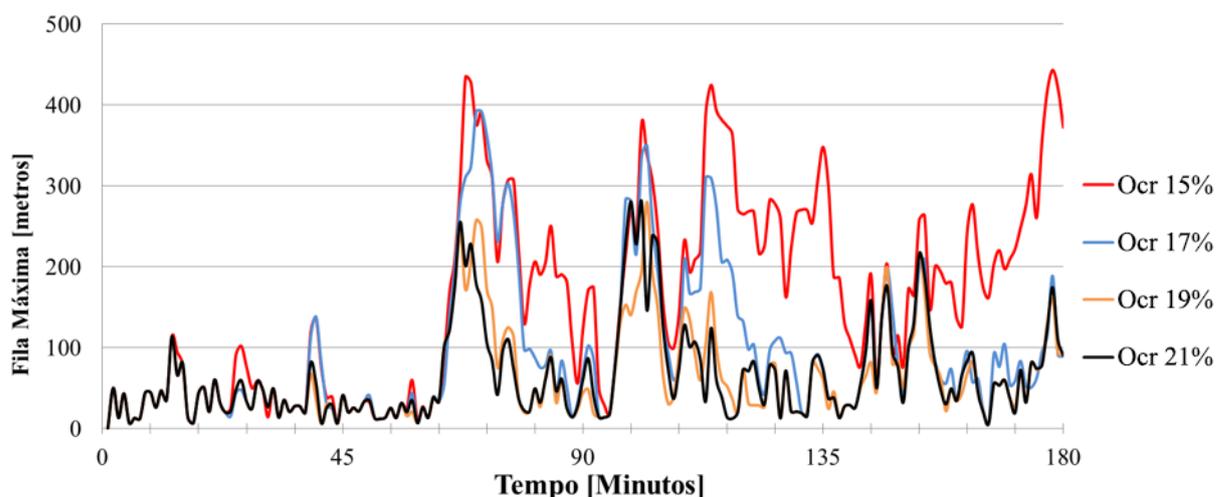
Figura 14 - Comprimento médio e máximo de fila na rampa de acesso



(fonte: elaborado pelo autor)

Ao avaliar as filas médias para os cenários com o ALINEA, destaca-se que para a ocupação considerada ideal (Ocr 19%), o comprimento médio é aceitável, com patamares de cerca de 31 metros. Já para as filas máximas, é importante destacar que o comprimento é inferior 350 metros, considerado o comprimento mínimo disponível de estoque de fila para um acesso, segundo Simpson et al. (2013). A Figura 15 apresenta o perfil de fila máxima por minuto dos cenários modelados. Através deste perfil, é possível novamente identificar que “Ocr 19%” possui um perfil de fila máxima sempre em patamares inferiores, e após os picos, o perfil retoma níveis menores mais rapidamente. A primeira hora de modelagem possui filas menores devido ao fato de que a simulação está em seu período de *warming up*, e ainda, a modelagem recebeu uma demanda constante nas três horas de simulação, e com isso a quantidade de veículos represados passa a aumentar.

Figura 15 - Perfil de fila máximo na rampa de acesso



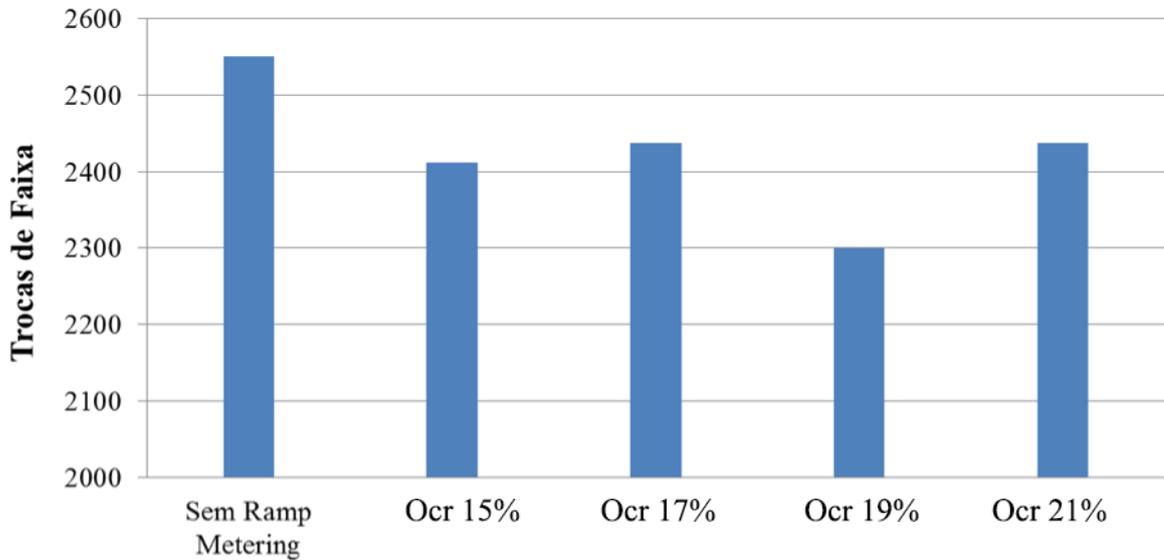
(fonte: elaborado pelo autor)

Assim como na avaliação dos tempos de viagem, o cenário onde a estratégia não foi empregada apresenta benefícios para os veículos da rampa, uma vez que nele não é detectada a formação de fila. Porém, cabe ressaltar que os benefícios que o *ramp metering* oferece ao tráfego da rodovia são globais, e ocorrem justamente através da penalização dos veículos advindos da rampa, o que é discutido na sessão a seguir.

## 9.2 PERFORMANCE DO TRÁFEGO NA RODOVIA

Mesmo com os tempos de viagem na rampa crescendo cerca de 100% para os cenários com melhor desempenho do ALINEA, é possível identificar benefícios no uso da estratégia, como um melhor controle de entrada dos veículos na rodovia através da quebra de pelotões. Como o *ramp metering* permite o ingresso de apenas um veículo por verde, essa quebra de pelotões torna o fluxo da via mais homogêneo e reduz as perturbações no tráfego, como ilustra a Figura 16, que apresenta o número de trocas de faixa no trecho que compreende o *taper* da rampa. Essas trocas de faixa foram contabilizadas para as Faixas 3 e 4 da rodovia, indicadas na Figura 11, sob o pressuposto de que seriam mais afetadas pelo acesso em relação às demais faixas. Como esperado, o cenário onde o *ramp metering* não é utilizado apresenta maior número de troca de faixas em relação aos cenários com a estratégia em operação. Os resultados indicam que o cenário “Ocr 19%” minimiza o número de trocas de faixas.

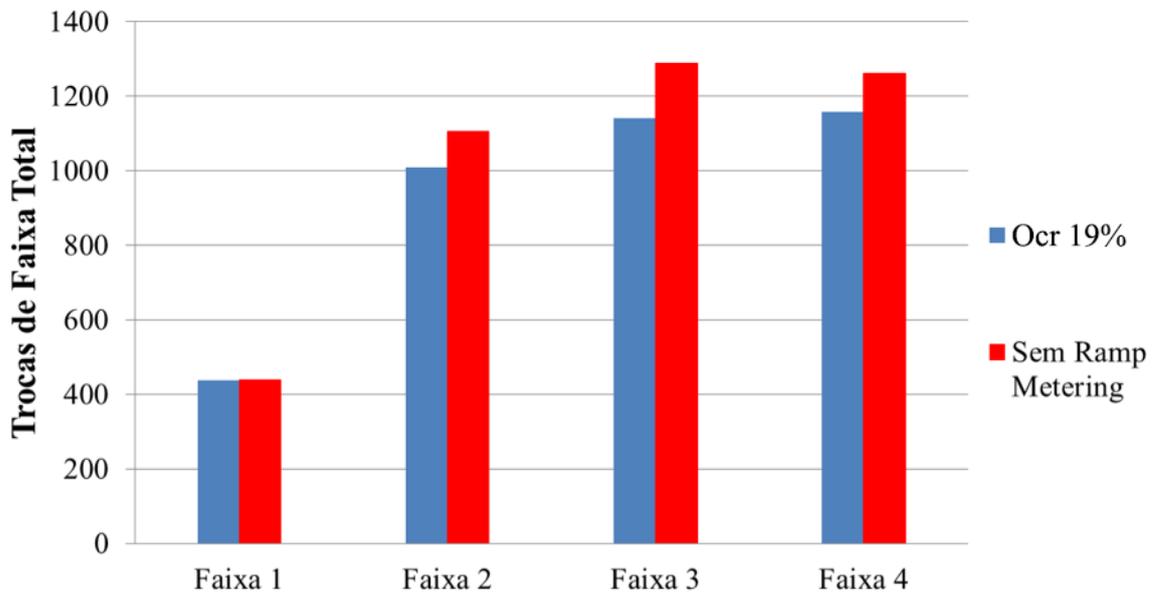
Figura 16 - Trocas de faixa no trecho que compreende o taper da rampa (Faixas 3 e 4)



(fonte: elaborado pelo autor)

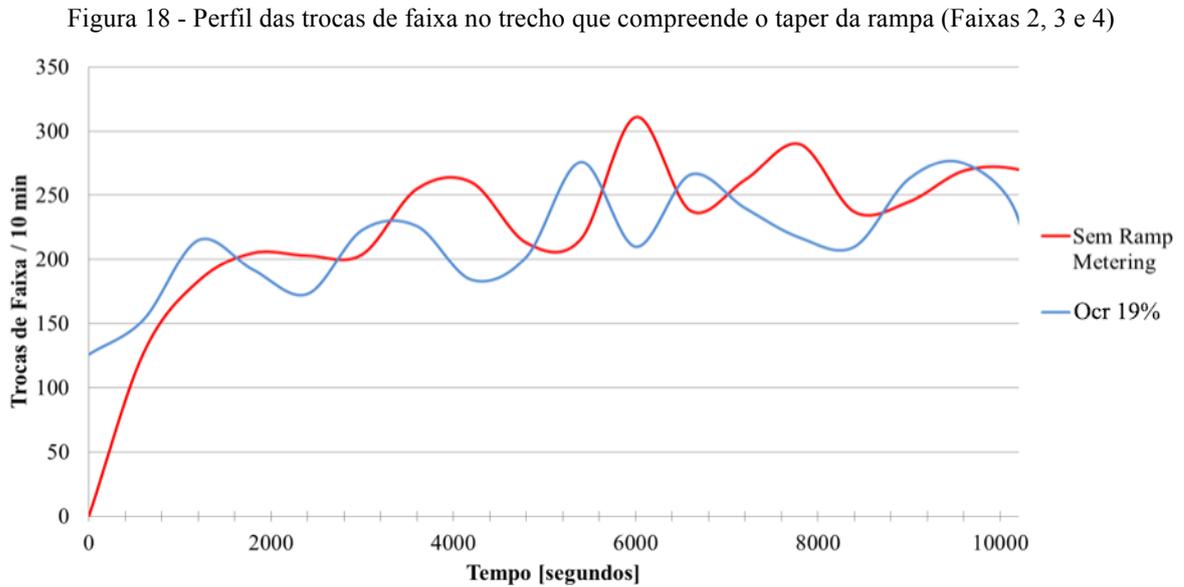
As análises feitas até então corroboram a hipótese inicial de que o valor de ocupação crítica de 19% obtido visualmente otimiza os resultados do algoritmo ALINEA, portanto passa-se a analisar este cenário individualmente. A avaliação do número de trocas de faixa em cada faixa individualmente indica que a perturbação gerada pela rampa não afeta a faixa a esquerda (Faixa 1), como ilustra a Figura 17. Além disso, percebe-se uma diminuição geral de 13% no número de trocas de faixa.

Figura 17 - Trocas de faixa por faixa



(fonte: elaborado pelo autor)

O perfil das trocas de faixa no trecho que compreende o *taper* da rampa também foi avaliado, e é apresentado na Figura 18. Percebe-se a tendência de que o número de trocas de faixa do cenário "Ocr 19%" se mantenha superior ao cenário sem *ramp metering* na maior parte da simulação.



(fonte: elaborado pelo autor)

## 10 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A magnitude do número de acidentes de trânsito frente aos demais problemas existentes na sociedade indica a importância de serem estudadas e aplicadas medidas mitigatórias. Além disso, uma má infraestrutura afeta diretamente a vida das pessoas reduzindo sua qualidade de vida, principalmente a de quem a utiliza diariamente.

As estratégias de gerenciamento ativo de tráfego surgem como alternativas de boa relação custo/benefício para estes problemas, fazendo uso da tecnologia para proporcionar melhorias inteligentes ao trânsito. Apesar de serem amplamente utilizadas em países desenvolvidos, estas estratégias carecem de estudos no Brasil e ainda são muito pouco utilizadas, especialmente o *ramp metering*, tema central deste estudo.

Para todos os cenários modelados neste estudo, com e sem a estratégia de *ramp metering*, os tempos de viagem e as velocidades médias da via principal não apresentaram diferenças significativas, mantendo-se abaixo de 2% e indo de encontro aos estudos de Chaudhary et al. (2004), Mirshahi et al. (2007) e Simpson, et al. (2013). O cenário com a ocupação crítica em 19% (Ocr 19%) reduziu o número de trocas de faixa em cerca de 13%, enquanto os cenários “Ocr 21%” e “Ocr 17%” reduziram as trocas de faixa em cerca de 4%. Portanto, uma análise global envolvendo os tempos de viagem e filas na rampa, juntamente com as trocas de faixa na via principal, indica que a ocupação crítica de 19% é a que otimiza a performance do algoritmo ALINEA.

Como o objetivo deste estudo é avaliar a aplicabilidade da estratégia de *ramp metering* em um cenário calibrado para representar uma via típica brasileira, optou-se por utilizar um modelo com parâmetros consagrados e recomendados pela literatura internacional e avaliar sua efetividade. Os resultados mostraram total compatibilidade com os benefícios adquiridos com a implantação do sistema em outros países, indicando potencial para implantação. Para trabalhos futuros sugere-se fazer uma análise mais profunda dos efeitos da calibração das variáveis que envolvem o algoritmo a fim de maximizar sua performance; estabelecer patamares de aplicabilidade para a estratégia e avaliar a aplicabilidade um sistema global de gerenciamento ativo de tráfego, fazendo-se uso combinado das diversas estratégias existentes.

## 11 BIBLIOGRAFIA

AASHTO, A. Policy on geometric design of highways and streets. **American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC**, v. 1, n. 990, 2001.

ADOT. **ADOT Traffic Engineering Guidelines and Processes (TGP) 222**. Junho, p. 1–2, 2015.

CALEFFI, F.; MOISAN, Y.; CYBIS, H. B. B. Analysis of an Active Traffic Management System Proposed for A Brazilian Highway. **International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering**, v. 6, n. 4, p. 10–17, 2016.

CAMBRIDGE SYSTEMATICS INCORPORATED. **Twin Cities Ramp Meter Evaluation - Final Report**. 2001.

CHAUDHARY, N. et al. Ramp metering algorithms and approaches for Texas. **FHWA/TX-05/0-4629-1, Technical Report 0-4629-1**, v. 7, n. 2, 2004.

Chu, L., H.X. Liu, W. Recker, and H.M. Zhang. Development of a Simulation Laboratory for Evaluating Ramp Metering Algorithms. **Paper 02-3427 presented at the TRB Annual Meeting**, Washington, D.C., Janeiro 2002.

CONTRAN. **Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito - Sinalização Semafórica**. v. 5, 2014.

CONTRERAS-SWEET, M.; MEDINA, J.; DAVIS, G. **Ramp Meter Design Manual**. p. 52, 2000.

DNIT. **Número de acidentes por hora de ocorrência**, 2011. Disponível em <<https://189.9.128.64/download/rodovias/operacoes-rodoviaras/estatisticas-de-acidentes/quadro-0104-numero-de-acidentes-por-hora-da-ocorrencia-ano-de-2011.pdf>>  
Acesso em: 15 mai. 2016

DNIT. **Número de acidentes por tipo e gravidade**, 2011. Disponível em <https://189.9.128.64/download/rodovias/operacoes-rodoviaras/estatisticas-de->

acidentes/quadro-0102-numero-de-acidentes-por-tipo-e-gravidade-ano-de-2011.pdf>. Acesso em: 15 mai. 2016

ELEFTERIADOU, Lily. **An introduction to traffic flow theory**. New York, NY: Springer, p. 107, 2014.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. **Ramp Metering: A Proven Effective Strategy.**, p. 40–43, Setembro, 2014.

FIRJAN. **O Custo Dos Deslocamentos Nas Principais Áreas Urbanas Do Brasil**, 2015. Disponível em <<http://www.firjan.com.br/publicacoes/publicacoes-de-economia/o-custo-dos-deslocamentos-nas-principais-areas-urbanas-do-brasil.htm>>. Acesso em: 15 mai. 2016

HADJ-SALEM, H.; BLOSSEVILLE, J. M.; PAPAGEORGIOU, M. Alinea. A local feedback control law for on-ramp metering; a real-life study. **Third International Conference on Road Traffic Control**, p. 194–198, 1990.

HIGHWAYS AGENCY. **Ramp metering - summary report**. 2007.

Jacobson, L., K. Henry, and O. Mahyar. Real-Time Metering Algorithm for Centralized Control. **Transportation Research Record 1232**, National Research Council, Washington, D.C., 1989.

LI, Z. et al. Surrogate safety measure for evaluating rear-end collision risk related to kinematic waves near freeway recurrent bottlenecks. **Accident Analysis and Prevention**, v. 64, p. 52–61, 2014.

Messer C.J., M. Thomadakis, H. Charara, and T. Urbanik II. Ramp Adaptive Metering Bottleneck, Optimization (RAMBO) User's Manual. **TTI Report FHWA/TX-94/1232-31**, College Station, Texas, November 1994.

MESSNER, A.; PAPAGEORGIOU, Markos. METANET: A macroscopic simulation program for motorway networks. **Traffic Engineering & Control**, v. 31, n. 8-9, p. 466-470, 1990.

MIZUTA, A. et al. **Ramp Metering: A Proven, Cost-Effective Operation Strategy - A primer**. 2014.

NEUDORFF, L. et al. Freeway management and operations handbook. **Fhwa-Op-04-003**, v. 2003, n. Setembro, 2003.

Papageorgiou, M., H. Hadj-Salem, and F. Middelham. ALINEA Local Ramp Metering. **Transportation Research Record 1603**, National Research Council, Washington, D.C., 1991

PAPAGEORGIOU, M.; HADJ-SALEM, H.; MIDDELHAM, F. ALINEA local ramp metering: Summary of field results. **Transportation Research Record**, v. 1603, n. 970032, p. 90–98, 1997.

SIMPSON, S.; RILEY, D.; UNITED CIVIL GROUP. **Ramp Metering Design Guide**. Novembro, 2013.

Zhang, M., T. Kim, X. Nie, and W. Jin. Evaluation of On-ramp Control Algorithms. **California PATH Research Report UCB-ITS-PRR-2001-36**. Dezembro, 2001.