

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

Gabriel Alvez Weimer

**APLICAÇÃO DE UM SISTEMA DE *RAMP METERING*
NA BR-290**

Porto Alegre
dezembro 2017

GABRIEL ALVEZ WEIMER

**APLICAÇÃO DE UM SISTEMA DE *RAMP METERING* NA
BR-290**

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: Douglas Zechin

Porto Alegre
dezembro 2017

GABRIEL ALVEZ WEIMER

**APLICAÇÃO DE UM SISTEMA DE *RAMP METERING* NA
BR-290**

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 2017

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

Eng. Douglas Zechin
Engenheiro 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

Eng. Douglas Zechin
(UFRGS)
Engenheiro 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,
Elton e Graciela, que fizeram de tudo
para possibilitar esse momento.
Também agradeço meu irmão, Eduardo,
por ser um excelente exemplo e me ensinar,
desde pequeno, a lutar pelos meus sonhos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Profa. PhD Helena Beatriz Bettella Cybis e ao Eng. Douglas Zechin, orientadora e coorientador deste trabalho, respectivamente, por todo suporte oferecido desde a concepção até a conclusão do mesmo.

Ao Mr. Felipe Caleffi pelas inúmeras ajudas oferecidas, não somente no decorrer deste trabalho, mas em todo período de bolsa de iniciação científica. À Laísa Kappler, ex-colega de iniciação científica e atual mestranda do Laboratório de Sistemas de Transporte, por todo apoio com os dados do VISSIM e com as pesquisas em geral.

Aos colegas de laboratório, Manon, Lucas, Francisco e Maurício, pelas resenhas, momentos de descontração e prestatividade quando precisei.

Ao meu irmão Eduardo Weimer, por me inspirar a buscar fazer mais e mais. Aos meus pais Elton Weimer e Graciela Alvez Weimer, que incondicionalmente me deram suporte para a realização desta faculdade.

Started from the bottom, now we're here.
Drake

RESUMO

Existem três maneiras básicas de melhorar o tráfego de veículos, por investimento na infraestrutura, através de medidas de gerenciamento de tráfego ou, em condições especiais através de ações de gerenciamento da demanda. *Ramp metering* é uma estratégia de gerenciamento que busca controlar o acesso de veículos oriundos de pistas secundárias a pistas principais, ou *freeways*. É um sistema inteligente de transporte amplamente aplicado internacionalmente, com seus benefícios já atestados. Este trabalho propõe a aplicação de um sistema de *ramp meters* nas rampas de acesso à BR-290, sentido interior-Porto Alegre. Os controles nas rampas seriam feitos na BR-448, no acesso da ponte nova do Guaíba (em construção) e atual ponte do Guaíba. Para isso foi utilizado o simulador computacional VISSIM. A calibração do modelo, montagem do traçado e aplicação de demandas são oriundos de trabalhos previamente realizados no Laboratório de Sistemas de Transportes (UFRGS). Os cenários analisados abrangem: nenhum *ramp meter*, *ramp meter* somente na BR-448, e *ramp meter* em todos os acessos. O algoritmo utilizado de controle de liberação de veículos foi de Demanda-Capacidade, por sua transparência e simplicidade. O fator de maior importância para este algoritmo é a determinação da capacidade da pista, para o qual foram abordados dois vieses, capacidade por gráfico de fluxo e velocidade e probabilidade de *breakdown*. Para os cenários sem *ramp meter* e com *ramp meter* somente na rampa de acesso 1 (BR-448), os tempos de viagem e atrasos não apresentaram diferenças significativas, mantendo-se abaixo da casa dos 2%. Já comparando os atrasos entre o cenário sem *ramp meter* e *ramp meter* em todos os acessos, foram encontradas diferenças de aproximadamente 3,7%. Este resultado, porém, foi destrinchado entre período em que o *ramp meter* estava ativado e desligado e os valores respectivos de 3,71% e 3,66% foram evidenciados, o que caracteriza um comportamento geral de menores atrasos, não necessariamente um resultado a ser atribuído ao *ramp meter*.

ABSTRACT

There are three basic ways to improve vehicle traffic, by infrastructure investment, traffic management measures, or special conditions through demand management actions. Ramp metering is a management strategy that seeks to control the access of vehicles from secondary tracks to main tracks, or freeways. It is an intelligent transportation system widely applied internationally, with its benefits already attested. This work proposes the application of a ramp meters system in the access ramps to the BR-290, direction Porto Alegre. Ultimately there would be installed ramp meters in the road BR-448, at the exit of the new bridge of the Guaíba River (under construction) and current bridge of the Guaíba River. To accomplish it, the VISSIM computer simulator was used. The calibration of the model, assembly of the trace and application of demands come from previous work carried out at the Laboratory of Transport Systems (UFRGS). The scenarios analyzed include: no ramp meter, ramp meter only on the BR-448, and ramp meter at all accesses. The algorithm used to control the release of vehicles was Demand-Capacity, due its transparency and simplicity. The most important factor for this algorithm is the determination of the freeway capacity, for which two ideas were approached: capacity per flow and speed chart and breakdown probability. Finally, we discuss the results obtained for the different scenarios as well as hypotheses to be investigated in the future for BR-290. For scenarios without ramp meter and with only on ramp 1 (BR-448), travel times and delays did not show significant differences, remaining below the 2% mark. When comparing the delays between the scenario without ramp meter and ramp meter in all accesses, differences of approximately 3.7% were found. This result, however, was disintegrated between the period when the ramp meter was on and off and the respective values of 3.71% and 3.66% were evidenced, which characterizes a general behavior of lower delays, not necessarily a result to be assigned to the ramp meter.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Modelo de operação de <i>ramp metering</i>	19
Figura 2 - Fenômeno breakdown.....	21
Figura 3 - <i>Ramp Metering</i> em operação no mundo	23
Figura 4 - <i>Ramp metering</i> ativos nos Estados Unidos.....	23
Figura 5 - Categorias e Implantações de <i>Ramp Metering</i>	24
Figura 6 - Excesso de fila na rampa	28
Figura 7 - Configurações geométricas da rampa de acesso.....	29
Figura 8 - Distância de aceleração.....	32
Figura 9 - Detector por laço indutivo	33
Figura 10 - Sinalização do <i>ramp metering</i>	35
Figura 11 - Sinalização semafórica	35
Figura 12 - Placa de advertência.....	36
Figura 13 - Sinalização de advertência.....	36
Figura 14 - Gráficos de fluxo e velocidade comparando dados simulados e coletados na BR-290	42
Figura 15 - Trecho analisado (sem ponte nova, em construção).....	43
Figura 16 - Traçado utilizado para nova ponte do Guaíba	44
Figura 17 - Perfil de demanda ao longo do tempo introduzido na simulação	45
Figura 18 - Vista superior do projeto e detalhe para rampa de acesso 1 - BR-448 e BR-290..	50
Figura 19 - Vista superior do projeto e detalhe para rampa de acesso 2 - Ponte nova e BR-290	51

Figura 20 - Vista superior do projeto e detalhe para rampa de acesso 3 - Ponte atual e BR-290	51
Figura 21 - Gráfico de Velocidade e Fluxo da Rampa 1	52
Figura 22 - Gráfico de Velocidade e Fluxo da Rampa 2	52
Figura 23 - Gráfico de Velocidade e Fluxo da Rampa 3	53
Figura 24 - Probabilidade de <i>Breakdown</i>	53
Figura 25 - Probabilidade de <i>Breakdown</i>	53
Figura 26 - Probabilidade de <i>Breakdown</i>	54
Figura 27 - Gráfico de demanda em cada rampa pelo tempo	57
Figura 28 - Fluxo e Velocidade no tempo sem <i>ramp metering</i>	61
Figura 29 - Fluxo e velocidade com <i>ramp metering</i> na rampa 1	62
Figura 30 - Fluxo e velocidade com <i>ramp metering</i> na rampa 1	62
Figura 31 - Gráfico de velocidade e período de ativação do <i>ramp meter</i>	63
Figura 32 - Fluxo e velocidade sem <i>ramp metering</i>	64
Figura 33 - Fluxo e velocidade com <i>ramp metering</i>	64
Figura 34 - Fluxo e velocidade sem <i>ramp metering</i>	65
Figura 35 - Fluxo e velocidade com <i>ramp metering</i>	65
Figura 36 - Fluxo de entrada da rampa e <i>freeway</i>	66
Figura 37 - Fluxo de entrada da rampa e <i>freeway</i>	67
Figura 38 - Velocidade antes e depois da interseção, com <i>ramp metering</i>	69
Figura 39 - Velocidades antes e depois da interseção, com <i>ramp metering</i>	69
Figura 40 - Velocidades antes e depois da inteseção, com <i>ramp metering</i>	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estratégias de ciclo e faixas	26
Tabela 2 - Distância de parada	31
Tabela 3 - Principais detectores usados	34
Tabela 4 - Placas comuns de sinalização.....	37
Tabela 5 - Volumes obtidos em pontos de coleta da BR-290	45
Tabela 6 - Capacidades à jusante adotadas nos algoritmos de ramp metering.....	55
Tabela 7 - Valores recomendados para implantação de <i>ramp metering</i>	56
Tabela 8 - Demanda de pico por rampa.....	57
Tabela 9 - Comprimento de Fila [m]	57
Tabela 10 - Distância de aceleração	58
Tabela 11 - Resumo dos tempos de viagem e atraso da simulação.....	59

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	DIRETRIZES DA PESQUISA.....	16
2.1	QUESTÕES DE PESQUISA.....	16
2.2	OBJETIVOS DE PESQUISA	16
2.2.1	<i>Objetivo principal.....</i>	<i>16</i>
2.2.2	<i>Objetivos secundários</i>	<i>16</i>
2.3	PRESSUPOSTO.....	16
2.4	LIMITAÇÕES	17
3	RAMP METERING: VISÃO GERAL	18
3.1	PROPÓSITOS DO RAMP METERING.....	19
3.2	BENEFÍCIOS DO RAMP METERING	20
3.2.1	<i>Ramp Metering e o efeito Breakdown</i>	<i>20</i>
3.2.2	<i>Precauções salientadas</i>	<i>21</i>
3.3	APLICAÇÃO E EXPERIÊNCIAS INTERNACIONAIS	22
3.4	ESTRATÉGIAS	24
3.4.1	<i>Base de dados: Tempos fixos ou responsivo</i>	<i>25</i>
3.4.2	<i>Fluxo: nº de faixas e carros por verde</i>	<i>25</i>
3.4.3	<i>Área de Influência: Local ou Coordenado</i>	<i>27</i>
4	DESIGN E IMPLANTAÇÃO.....	28
4.1	GEOMETRIA E INFRAESTRUTURA	29
4.1.1	<i>Comprimento da fila de veículos</i>	<i>29</i>
4.1.2	<i>Distância de desaceleração.....</i>	<i>30</i>
4.1.3	<i>Distância de aceleração</i>	<i>31</i>
4.1.4	<i>Localização da linha de parada</i>	<i>32</i>
4.2	EQUIPAMENTOS E SINALIZAÇÃO	32
4.2.1	<i>Detectores.....</i>	<i>33</i>
4.2.2	<i>Semáforos</i>	<i>34</i>
4.2.3	<i>Placas e marcações</i>	<i>35</i>
4.3	ALGORITMOS	38
4.3.1	<i>Controle Local.....</i>	<i>38</i>
4.3.1.1	<i>Tempos fixos</i>	<i>38</i>
4.3.1.2	<i>Responsivo</i>	<i>38</i>

4.3.2	<i>Controle Coordenado</i>	38
4.3.2.1	Cooperativo	39
4.3.2.2	Competitivo	39
4.3.2.3	Integral.....	39
5	METODOLOGIA	40
5.1	SIMULAÇÃO	40
5.1.1	<i>VISSIM</i>	40
5.1.1.1	Calibração do microssimulador VISSIM	40
5.2	TRECHO ANALISADO	42
5.2.1	<i>Demanda e rotas</i>	44
5.3	ALGORITMO DE CONTROLE DE RAMPA	46
5.3.1	<i>Capacidade</i>	48
5.3.2	<i>Taxas máximas e mínimas de liberação</i>	55
5.4	INSERÇÃO DO <i>RAMP METERING</i> NA VIA DE ACESSO – ASPECTOS GEOMÉTRICOS	56
5.5	CENÁRIOS ANALISADOS	58
6	RESULTADOS	59
6.1	TEMPOS DE VIAGEM	59
6.2	FLUXO E VELOCIDADE.....	60
7	DISCUSSÃO	68
8	CONCLUSÃO	71
9	REFERÊNCIAS	73

1 INTRODUÇÃO

Tanto em economias avançadas quanto em desenvolvimento, cidades têm enfrentado piora nos congestionamentos, com as autoridades tendo dificuldade em lidar com a manutenção e investimentos em suas rodovias (KURZHANSKIY; VARAIYA, 2015). Porto Alegre é um exemplo desse cenário, sofrendo diariamente com congestionamentos em seus horários de pico da manhã e tarde (PÚGLIA, 2016).

Entre os anos de 2004 e 2016, a Confederação Nacional do Transporte avaliou 100% da malha rodoviária pavimentada do país. O estudo demonstrou que, durante os 13 anos de pesquisa, 57,3% das rodovias públicas analisadas seguem em condição inadequada. Além disso, com a crise econômica sentida no Brasil a partir de 2014, os investimentos no setor tem apresentado tendência de redução. Em 2016, por exemplo, os recursos aplicados retrocederam praticamente ao equivalente aplicado em 2008. Em contrapartida, mesmo com a queda na aquisição de veículos devido à crise, a frota brasileira teve aumento de 23,33 milhões de unidades entre 2012 e 2016.

O aumento na demanda e a não conformidade na oferta acarretam em números e consequências indesejáveis. Como indica o estudo da CNT (2017), no ano de 2016, em rodovias federais, contabilizou-se um prejuízo estimado em R\$10,88 bilhões devido a acidentes.

Em contraponto à realidade demonstrada, Caleffi (2013) indica que o crescimento na demanda intensifica a necessidade de promover ações para reduzir os congestionamentos e os impactos negativos no trânsito. Entretanto, investimentos de ampliação da infraestrutura viária são limitados e comumente insuficientes para acompanhar o aumento dessa demanda (CALEFFI; CYBIS, 2016). Uma solução de menor impacto econômico sendo adotada em países com melhores condições tecnológicas tem sido o gerenciamento ativo do tráfego (CALEFFI, 2013).

O gerenciamento ativo de tráfego consiste em técnicas e sistemas usados para controlar dinamicamente o congestionamento recorrente e não recorrente com base nas condições de tráfego existentes. Baseando-se em recorrência de viagens, o gerenciamento ativo busca maximizar a eficiência e efetividade da infraestrutura (MIRSHAHI et al., 2007).

Uma alternativa de gerenciamento ativo de tráfego comumente utilizada no mundo, sendo amplamente difundida nos Estados Unidos, é o *ramp metering*, foco deste trabalho. Segundo Chaudhary et al., (2004), quando bem inserido no sistema viário, *ramp metering* é responsável por, entre outros benefícios, incrementar a produtividade da via e aumentar a segurança na via principal e suas entradas. Buscando estender sua aplicabilidade para o sistema brasileiro, este trabalho visou adequar o proposto por (ZECHIN, 2016) a diversos pontos de acesso para a rodovia brasileira BR-290 nos arredores de Porto Alegre e assim entender a aplicabilidade dessa ferramenta de gerenciamento ativo de tráfego na nossa realidade nacional, através do uso do simulador computacional de tráfego VISSIM.

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: aplicar controle de acesso nos pontos de acesso da BR-290 melhora a fluidez do trânsito nesse trecho da rodovia, reduzindo tempos de viagens e aumentando a velocidade média dos veículos na via principal?

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 avaliar, através de simulação de tráfego, se a aplicação de *ramp meters* em diversos pontos de acesso melhora o tráfego na rodovia BR-290.

2.2.2 Objetivos secundários

Os objetivos secundários do trabalho são:

- a) Analisar a capacidade da via BR-290 através da premissa de probabilidade de *breakdown*;
- b) Aplicação e calibração de um algoritmo de *ramp metering* através de simulador de trânsito VISSIM e lógica VAP;
- c) Análise quanto do ponto crítico da via, buscando maior entendimento do comportamento real do trecho.

2.3 PRESSUPOSTO

O trabalho parte do pressuposto de que o cenário utilizado no simulador de trânsito VISSIM representa a realidade, gerando assim resultados válidos.

2.4 LIMITAÇÕES

Representam limitações do trabalho a infraestrutura presente no local escolhido, tendo em vista a noção abordada no trabalho de prover uma ferramenta economicamente viável.

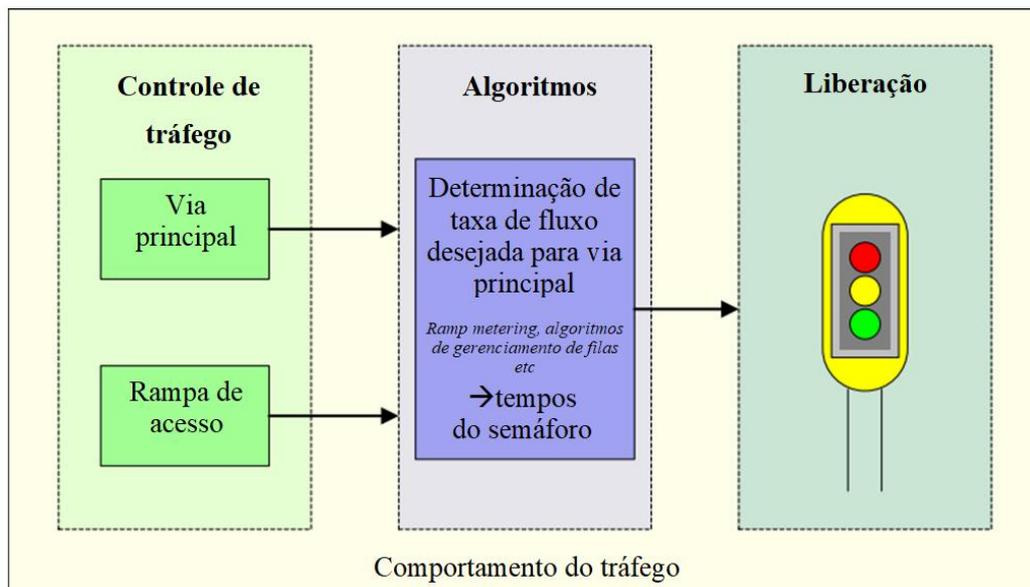
3 RAMP METERING: VISÃO GERAL

A estratégia de controlar o fluxo de veículos oriundos de acessos secundários à via principal tem se tornado peça chave de sistemas avançados de controle de tráfego. Seu primeiro teste, entretanto, precede até mesmo o uso dos Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS, do inglês *Intelligent Transportation System*). O primeiro registro do *ramp metering* data de 1963, em Chicago, onde um policial permanecia ao lado da rampa de acesso, liberando veículos para acessarem a via principal um por vez (PIOTROWICZ; ROBINSON, 1995).

Desde 1963, este modelo vem sendo desenvolvido até o ponto de ser aplicado em diversas cidades nos Estados Unidos e no mundo. A estratégia, hoje, consiste da utilização de três principais equipamentos (MIZUTA et al., 2014):

- a) Semáforos;
- b) Detectores;
- c) Placas de sinalização.

O funcionamento mais usualmente encontrado de operações com *ramp metering* pode ser descrito conforme Zechin (2016, p. 20): “[...] 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.”. Abordando o funcionamento de uma maneira mais funcional, o modelo de operação de *ramp metering* monitora a condição do tráfego na via principal (à montante e jusante do ponto de acesso da rampa) e na rampa. Seus algoritmos, de posse desses dados, monitoram e controlam a taxa de liberação de veículos na rampa. O semáforo, então, é utilizado para informar os motoristas em relação à liberação ao acesso na via principal (EASYWAY, 2012). A Figura 1 abaixo ilustra esse modelo:

Figura 1 - Modelo de operação de *ramp metering*

(fonte: adaptado de EASYWAY, 2012)

3.1 PROPÓSITOS DO *RAMP METERING*

Segundo Chaudhary et al. (2004), *ramp meters* são instalados visando três objetivos operacionais principais:

1. Controlar o número de veículos permitidos a ingressar na *freeway*,
2. Reduzir a demanda na *freeway*, e
3. Quebrar os pelotões de veículos liberados de um semáforo à montante da rampa de acesso.

O propósito principal dos dois primeiros objetivos é garantir que o fluxo de entrada na *freeway* permaneça inferior à capacidade da *freeway*, ou de seu *bottleneck*. Um propósito alcançado de maneira secundária é a introdução de atraso programado imposto a veículos que desejam ingressar na *freeway*. Este atraso reduz o incentivo do uso da *freeway* para as horas mais intensas do dia. O terceiro propósito, alcançado através da quebra de pelotões, é a interseção segura dos veículos que estavam na via secundária na via primária (*freeway*) (CHAUDHARY et al., 2004).

Cabe salientar a ressalva de Mizuta et al. (2014) de que cada agência reguladora, ou entidade responsável, deve ser consistente com os objetivos e propósitos de sua região, tendo em vista suas particularidades. As abordagens devem ser implantadas calibrando-se o sistema às necessidades mais expressivas para seu local.

3.2 BENEFÍCIOS DO *RAMP METERING*

Independentemente do sistema de *ramp metering*, conforme explicitado no tópico anterior, ele deve ser pensado de maneira a potencializar os benefícios mais adequados a sua região. A magnitude dos benefícios também sofrerá impacto com o nível de congestionamento enfrentado na rede viária e sua configuração (MIZUTA et al., 2014). Entretanto, mesmo com abordagens distintas, percebem-se na literatura benefícios recorrentes como (CHAUDHARY et al., 2004; EASYWAY, 2012; MIZUTA et al., 2014; PIOTROWICZ; ROBINSON, 1995; SEUNGMIN; GILLEN, 1999):

- a) Aumento da capacidade da via principal;
- b) Diminuição de tempos de viagem e maior homogeneização destes;
- c) Maior segurança na via, através de redução de acidentes e colisões;
- d) Decréscimo no consumo de combustível e emissões veiculares.

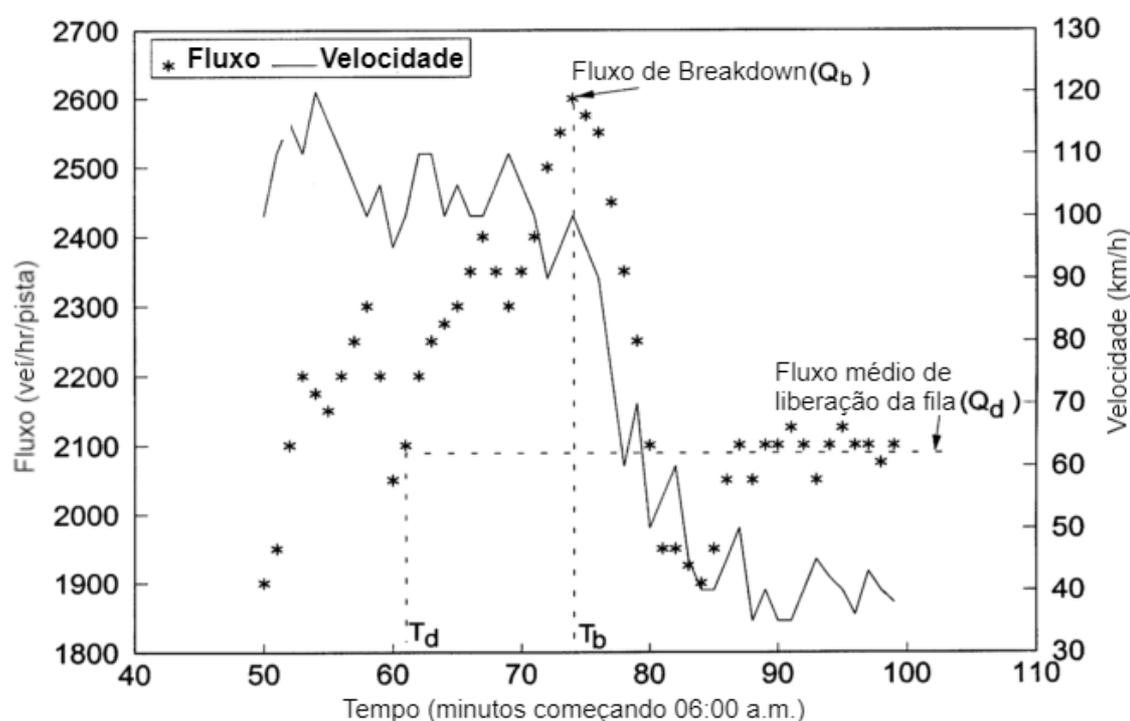
3.2.1 *Ramp Metering* e o efeito *Breakdown*

A noção de como, através do cumprimento dos objetivos operacionais explicitados na seção 3.1, serão alcançados benefícios, não é simples. Portanto, para o bom funcionamento e aperfeiçoamento do sistema de *ramp metering*, a relação fundamental entre o *ramp metering* e a capacidade da *freeway* deve ser estudada (ZHANG; LEVINSON, 2010).

O local de operação na rede viária onde se encontra o *ramp metering* é o que se denomina de gargalo, ou em inglês *bottleneck*. Este ponto, devido ao fluxo de demanda adicional ingressando na *freeway*, se torna crítico para o efeito *breakdown*. O efeito *breakdown* é explicado por Persaud et al. (1998) como sendo a operação de uma *freeway* próxima a um gargalo em um momento em que o fluxo deixa de ser não congestionado e filas começam a se formar, com queda brusca da velocidade dos condutores.

Como pode ser visto na Figura 2 abaixo, temos uma rodovia que passou pelo processo de *breakdown*, em que sua capacidade de fluxo caiu drasticamente de Q_b para Q_d , depois do tempo T_b . Depois do *breakdown*, formam-se filas à montante do gargalo e o fluxo passa a ser congestionado (PERSAUD; YAGAR; BROWNLIEE, 1998). O *ramp metering*, ao controlar o acesso de veículos a *freeway* e quebrar pelotões, age de maneira a evitar os movimentos repetidos de freagem e aceleração e também evita o crescimento do fluxo a ponto de ocorrer o *breakdown* (ZECHIN, 2016).

Figura 2 - Fenômeno *breakdown*



(fonte: adaptado de Persaud et al., 1998)

3.2.2 Precauções salientadas

Existem algumas ressalvas destacadas na literatura referente ao potencial que o *ramp metering* apresenta para a melhora do tráfego. Chaudhary et al. (2004) explicita que a maior parte das *freeways* é composta por vias de múltiplas pistas, responsável por um tráfego muito intenso e de alta demanda nos horários de pico. Com isso, a demanda do tráfego oriunda de um acesso secundário, de via de pista simples, geralmente representa uma pequena parcela do tráfego total enfrentado na *freeway*. A indicação é de garantir que a aplicação do sistema de *ramp meters* seja em uma área abrangente da *freeway*, a fim de atingir todos os benefícios

potenciais e manter os motoristas satisfeitos. Área abrangente refere-se à seção que sofre impacto do tráfego de condutores que utilizam a *freeway*, como neste caso a região metropolitana de Porto Alegre.

Outro ponto relevante é o favorecimento do tráfego de grande fluxo em detrimento das viagens de menor abrangência, habitualmente realizadas pelos motoristas “locais” (SEUNGMIN; GILLEN, 1999). Estes fatores podem resultar em dificuldades relacionadas à equidade e aceitação pública, visto que o *ramp metering* pode ser visto como um favorecimento dos motoristas que moram fora do centro da cidade. Segundo Mizuta et al. (2014), estas oposições geralmente estão fundamentadas nas incertezas da população quanto à efetividade e eficiência do sistema, sendo estes tópicos, então, de discussão e esclarecimento obrigatórios para a população.

Como discutido anteriormente, os motoristas locais podem sentir-se penalizados de maneira desigual com o sistema. Esse ponto acarreta no que a literatura denomina extravasamento de demanda para vias arteriais urbanas e é intensificado não somente pela percepção negativa dos motoristas que evitam a rampa, mas também por uma taxa de liberação da rampa muito restrita (EASYWAY, 2012; MIZUTA et al., 2014; SEUNGMIN; GILLEN, 1999). Contudo, mesmo o extravasamento da demanda sendo um fator relevante para o sistema de *ramp metering*, dados empíricos indicam que um percentual de 5-10% de veículos que usariam a *freeway* troca para vias arteriais urbanas (SEUNGMIN; GILLEN, 1999).

3.3 APLICAÇÃO E EXPERIÊNCIAS INTERNACIONAIS

Ramp metering é uma invenção americana posterior aos anos 50, após implantação de *freeways* e *highways*, rodovias com múltiplas pistas e altas capacidades. Com o aumento da demanda e fluxo nestas vias expressas, os Estados Unidos tiveram conseqüente aumento substancial no número de congestionamentos e acidentes. Entretanto, similarmente à realidade brasileira, o governo americano encontrou limitações quanto à construção de maior infraestrutura viária, o que acarretou no desenvolvimento de novas estratégias de gerenciamento de tráfego e entre elas, o *ramp metering* (BERTINI, 2016).

Após a locação do primeiro sistema de *ramp metering* em Chicago, em 1963, seus benefícios ficaram conhecidos e a prática foi logo em seguida expandida para Detroit, Mineápolis e Los Angeles. Na Europa, o sistema começou a ser desenvolvido na Inglaterra em 1986 e

posteriormente nos Países Baixos em 1989. Apesar de o número de sistemas em uso na Europa não alcançar o americano, muitas tecnologias e algoritmos foram desenvolvidos em países europeus, como o algoritmo ALINEA, um dos mais utilizados ao redor do mundo (BERTINI, 2016).

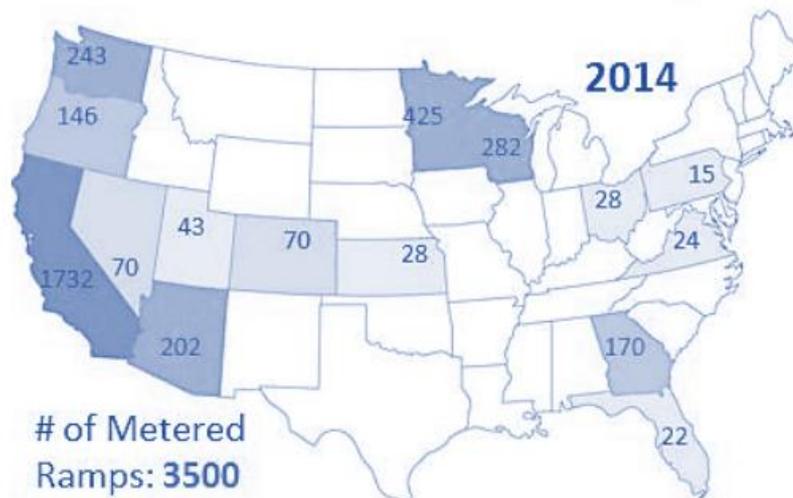
Na Figura 3 abaixo pode ser conferida a aplicação de *ramp metering* no mundo, enquanto que a Figura 4 mostra o desenvolvimento da estratégia nos Estados Unidos.

Figura 3 - *Ramp Metering* em operação no mundo



(fonte: adaptado de Bertini, 2016)

Figura 4 - *Ramp metering* ativos nos Estados Unidos



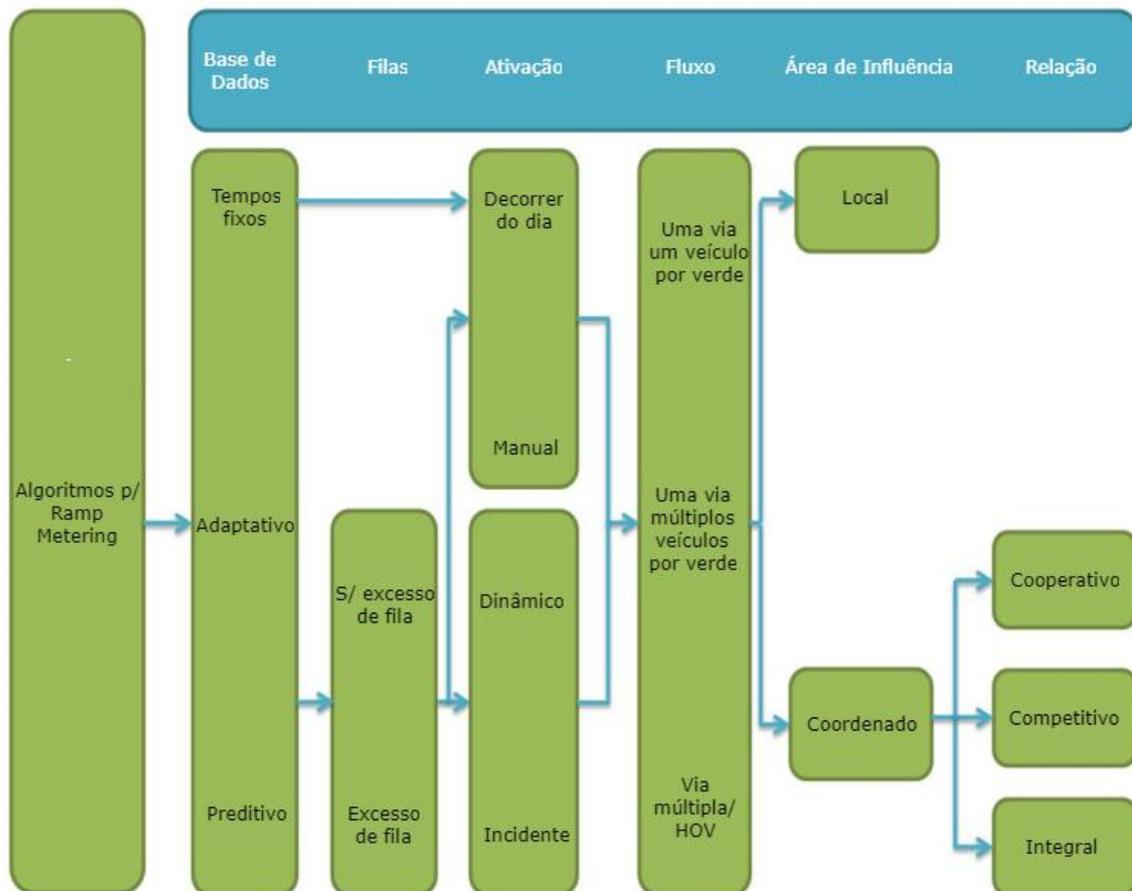
(fonte: adaptado de Bertini, 2016)

3.4 ESTRATÉGIAS

O sistema de *ramp metering* pode funcionar de maneira distinta, de acordo com os objetivos estipulados a partir da agência reguladora. Tendo em vista a demanda local de tráfego, limitações ambientais e qualquer outro fator que seja relevante, o *ramp metering* pode ser modificado adicionando ou removendo habilidades específicas (BERTINI, 2016). Essas habilidades são vinculadas e agrupadas em categorias, criadas por pesquisadores, sendo suas principais mencionadas abaixo:

- a) Base de Dados: Tempos fixos ou Responsivo;
- b) Fluxo: N° de faixas e carros por verde;
- c) Área de influência: Local ou Coordenado.

Figura 5 - Categorias e Implantações de *Ramp Metering*



(fonte: adaptado de Bertini, 2016)

3.4.1 Base de dados: Tempos fixos ou responsivo

Os dois métodos de controlar o sistema de *ramp metering* são, conforme Jacobson et al. (2006):

- 1) Tempos fixos: taxas de liberação são determinadas de acordo com dados históricos e estipulados para cada momento ou hora do dia;
- 2) Responsivo ao tráfego momentâneo: Dados em tempo real são usados para determinar parâmetros de controle, até mesmo selecionando momentos de operação ou desligamento do sistema.

O sistema de tempos fixos é o mais simples, visto que não exige infraestrutura de comunicação entre a via e o semáforo de liberação de veículos. Como contraponto, encontra-se grande rigidez neste sistema, visto que ele não possibilita alterações conforme demanda (JACOBSON et al., 2006). Essa estratégia pode apresentar benefícios ao fluxo da via principal, mas tem efetividade limitada para prevenir o efeito de *breakdown* e otimizar o fluxo (BURLEY; GAFFNEY, 2013).

O método responsivo é uma abordagem que reage às mudanças das condições do tráfego em tempo real, alterando os ciclos de funcionamento do *ramp metering*. Neste modelo, o algoritmo que irá calcular a configuração do sistema é que determina a sensibilidade necessária da coleta de dados em tempo real da via, como por exemplo velocidade, ocupação e densidade (BERTINI, 2016).

3.4.2 Fluxo: nº de faixas e carros por verde

O controle do fluxo se dá através da taxa de liberação dos veículos oriundos da rampa de acesso a *freeway*. As taxas máximas e mínimas de liberação de veículos assim como a fila gerada na rampa dependem de como esse controle é feito, que por sua vez depende de fatores como comprimento da rampa, número de faixas e volume do tráfego (JACOBSON et al., 2006). Existem três modelos de liberação de veículos, sendo estes de acordo com Chaudhary et al. (2004):

- 1) Faixa única e um carro por verde: Somente um veículo é liberado para acessar a via principal a cada ciclo do semáforo.
- 2) Faixa única e múltiplos veículos por verde: Essa estratégia permite o ingresso de dois ou mais veículos na via principal a cada ciclo e também é conhecida como *Metering* de Pelotões.

- 3) *Ramp Metering* com múltiplas faixas: Nessa estratégia, duas ou mais faixas são controladas com o sistema de *ramp metering*. Especialmente útil e prática para rampas nas quais são encontradas faixas específicas para veículos de alta ocupação (HOV, do inglês *High Occupancy Vehicle*) ou transporte público.

O menor ciclo possível para o Modelo 1 é de 4 segundos, sendo 1 segundo no sinal verde, 1 segundo no amarelo e dois no vermelho. Contudo, Chaudhary et al. (2004) contrapõe que este tempo de vermelho seria insuficiente para garantir a parada completa de todos os veículos antes do próximo ciclo, conforme observações em campo. A sugestão de ciclo mínimo seria, então, de 4,5 segundos.

Para o Modelo 2, a literatura reitera o cuidado de não ultrapassar o número de 3 veículos por ciclo a serem liberados para ingresso na via principal. Mais veículos podem ser liberados, entretanto, corre-se o risco de não mais quebrar os pelotões, um dos objetivos operacionais do *ramp metering* (BERTINI, 2016; CHAUDHARY et al., 2004).

Quando se usa a estratégia de múltiplas faixas, os ciclos de cada faixa devem ser intercalados para evitar confusão no processo de ingresso à via principal (BERTINI, 2016). Também existe um acréscimo na capacidade de estocagem de veículos na fila da rampa de acesso. Um resumo dessas estratégias, com tempos de ciclo e taxas de liberação, pode ser visualizado na tabela abaixo:

Tabela 1 - Estratégias de ciclo e faixas

Designação de estratégia	Número de faixas	Duração do ciclo (seg)	Taxas aproximadas de liberação (veí/h)	Capacidade (veí/h)*
Um veículo por verde	1	4 - 4,5 seg.	240-900	900
Múltiplos veículos por verde	1	6 - 6,5 seg.	240-1200	1100-1200
Múltiplas Faixas	2		400-1700	1600-1700

*Dependendo do comportamento do motorista, capacidades levemente superiores podem ocorrer.

(fonte: adaptado de Jacobson et al., 2006)

3.4.3 Área de Influência: Local ou Coordenado

O algoritmo de liberação na rampa pode estar vinculado a um sistema interligado com os outros acessos, de modo a otimizar o fluxo como um todo, ou observando a demanda local logo à montante da rampa. Essas duas visões variam em aplicabilidade e complexidade e podem ter impactos diferentes nos benefícios de implantação de *ramp metering*.

A aplicação de *ramp metering* local é otimizada quando a rampa é individual e não compõe uma rede de rampas próximas, de modo a visar os problemas e distúrbios gerados por aquele único acesso (BERTINI, 2016; CHAUDHARY et al., 2004; EASYWAY, 2012). Jacobson et al. (2006) ressalva que em algumas ocasiões é possível que o problema de congestionamento somente seja transferido para outro ponto da rede viária, visto que estes outros pontos não são levados em consideração para a aplicação local do *ramp metering*.

A abordagem Coordenada cria um sistema de *ramp metering* ao longo de uma extensão da rede viária, aprimorando as taxas de liberação não somente de acordo com as necessidades locais de cada rampa, mas também com as consequências de cada no sistema. O grande objetivo então não é liberar o congestionamento de uma rampa em específico, mas da rodovia principal como um todo (BERTINI, 2016; CHAUDHARY et al., 2004; EASYWAY, 2012; JACOBSON et al., 2006; SEUNGMIN; GILLEN, 1999).

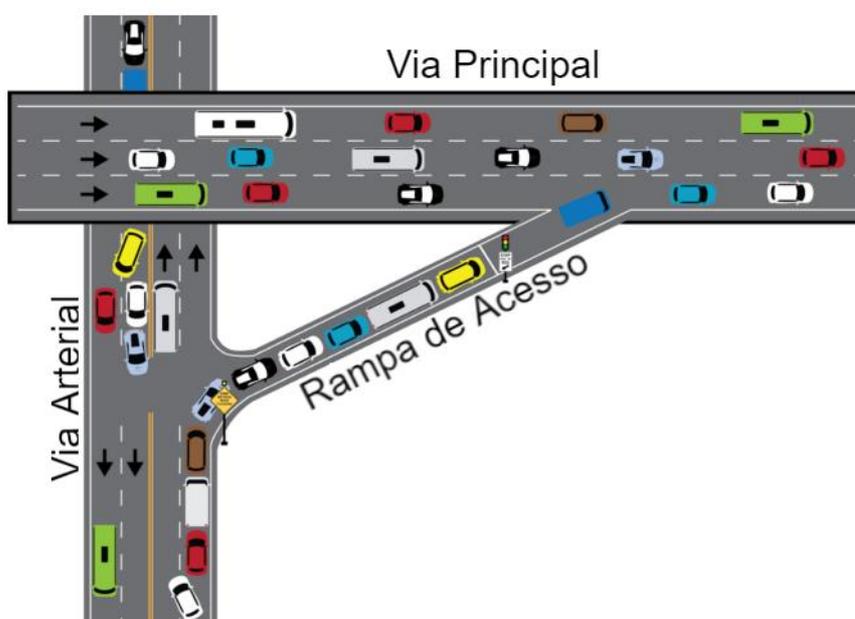
4 DESIGN E IMPLANTAÇÃO

Para a aplicação do sistema de *ramp metering*, o processo deve compreender alguns passos básicos como: a) análise de capacidade da rampa de acesso; b) análise de estoque de fila; c) desenvolvimento do traçado da geometria da pista e d) localização e escolha de componentes de sinalização (BURLEY; GAFFNEY, 2013). No caso desse trabalho, a infraestrutura viária já se encontra pronta e as rampas e equipamentos irão se adequar a estas, de maneira que o proposto aqui poderia vir a ser inserido com maior facilidade. Sendo assim, será considerado o traçado da geometria da pista existente.

Mizuta et al. (2014) menciona que *ramp metering* demanda determinados requisitos da rampa de acesso, tal como espaço suficiente para veículos ingressarem na pista principal e esperar na fila, em conformidade com as diretrizes de Burley et al (2013). Essas configurações devem ser conferidas para assegurar o correto funcionamento do sistema e a obtenção dos resultados esperados. Este capítulo decorre sobre as essas principais configurações geométricas a fim de assegurar a eficaz implantação do sistema de *ramp metering*, de forma a minizar problemas como os da

Figura 6, com excesso de veículos na rampa de acesso sendo despejados na via arterial.

Figura 6 - Excesso de fila na rampa

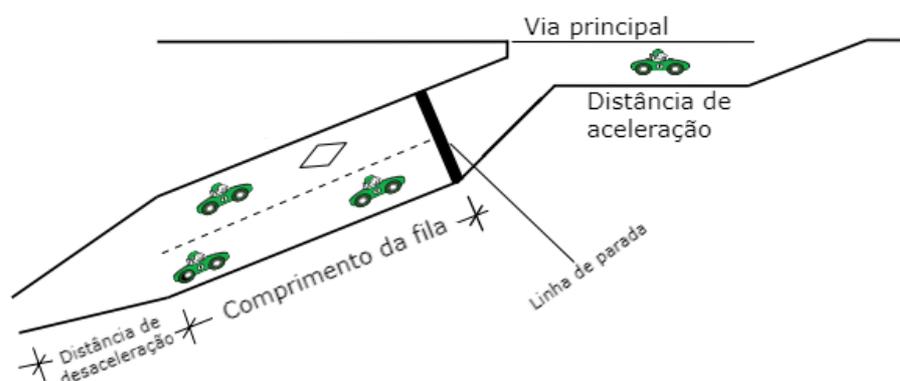


(fonte: adaptado de Mizuta et al., 2014)

4.1 GEOMETRIA E INFRAESTRUTURA

Uma geometria desfavorável da rampa de acesso configura uma das causas mais atenuantes de colisões na própria rampa ou acessos (JACOBSON et al., 2006). Ao mesmo tempo, o investimento e desenvolvimento da infraestrutura existente da geometria da rampa de acesso é um dos maiores obstáculos para a implantação do *ramp metering*. Em pesquisa com agentes que gerenciam *ramp metering* em cidades norte americanas, 55% dos casos estudados apontaram a geometria limitante atual das rampas como o maior obstáculo para a expansão do sistema (MIZUTA et al., 2014).

Figura 7 - Configurações geométricas da rampa de acesso



(fonte: adaptado de Wang, 2013)

4.1.1 Comprimento da fila de veículos

Para manter as vias arteriais livres de possíveis extravasamentos de veículos aguardando acesso à *freeway*, é importante garantir um espaço adequado de espera (CALTRANS, 2016). Geralmente esse comprimento de fila corresponde à distância entre o detector de fila, na entrada da rampa de acesso, e o semáforo do *ramp metering* (CHAUDHARY et al., 2004). O cálculo deve ser feito levando em consideração o fluxo no horário ou período de pico, e as fórmulas encontradas na literatura variam. Abaixo seguem os métodos apresentados por Chaudhary et al. (2004) e Caltrans (CALTRANS, 2016), respectivamente.

$$L = 0,820V - 0,0002435V^2 \quad (\text{equação 1})$$

Onde:

L = distância total necessária entre o detector de fila e o semáforo (pés);

V = fluxo esperado na hora de pico (veí/h).

A fórmula expressa por Caltrans (CALTRANS, 2016) expõe que rampas devem ser desenvolvidas com base em 7% da demanda da hora de pico para o ano de implantação. Além disso, considera-se o comprimento médio de um veículo como sendo 29 pés (8,84 metros).

Com isso, temos:

$$\frac{L}{via} = \frac{7\% \times \text{demandapico} \times 29\text{pés/veí}}{n^{\circ} \text{ de vias}} \quad (\text{equação 2})$$

Onde:

$\frac{L}{via}$ = distância total necessária entre o detector de fila e o semáforo (pés) para cada via;

demandapico = demanda de veículos entrando na rampa na hora de pico (veí).

O propósito do trabalho não é construir uma rampa e tampouco desenvolver infraestrutura, mas sim criar um sistema de gerenciamento ativo de tráfego que se adapte às condições existentes. Com isso, os comprimentos das rampas atuais encontrados serão discutidos e avaliados, baseando-se nos resultados da aplicação do sistema e as consequentes filas geradas na rampa de acesso.

4.1.2 Distância de desaceleração

Em rodovias de alta velocidade, é interessante atentar para a distância adequada a ser fornecida para os usuários terem tempo de tomar uma decisão sem realizar manobras arriscadas (CALTRANS, 2014). A distância de desaceleração é, então, o comprimento adequado de rodovia destinado a garantir que os veículos advindos das vias arteriais consigam parar atrás da fila de retenção de veículos na rampa de acesso, sem gerar conflito na via arterial. Na Tabela 2 abaixo temos as velocidades permitidas na via arterial ou de acesso à rampa (CALTRANS, 2014, 2016).

Tabela 2 - Distância de parada

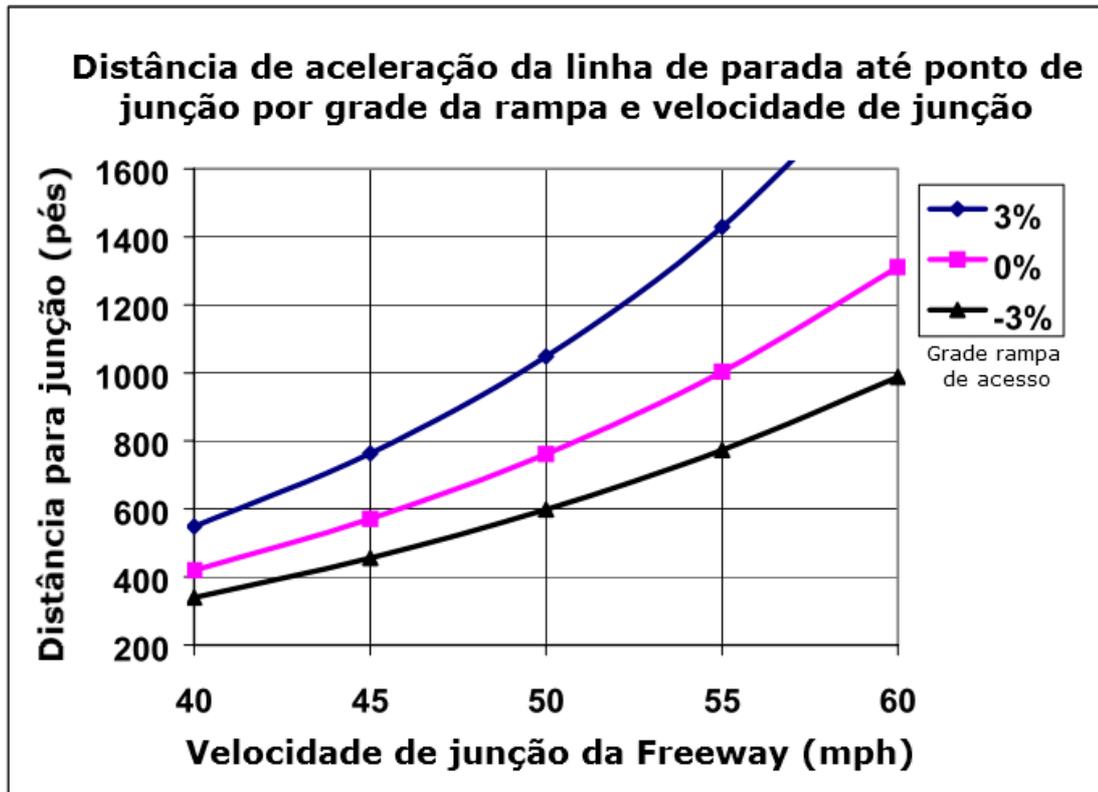
Velocidade (km/h)	Distância de parada
48	137
56	160
64	183
72	206
80	229
89	264
97	302
105	320
113	337
121	360
129	384

(fonte: adaptado de Caltrans, 2014)

4.1.3 Distância de aceleração

A distância de aceleração é medida da linha de parada dos veículos na rampa de acesso até o ponto de interseção destes com a via principal. Essa distância deve ser grande o suficiente para assegurar uma operação fluida. Conforme (AASHTO, 2001), a velocidade de interseção dos veículos oriundos da rampa de acesso deve estar compreendida entre ± 5 mph, ou 8 km/h, da velocidade de operação da via principal. Segue abaixo gráfico para determinação da distância de aceleração, considerando greide da rampa de acesso e velocidade de interseção da *freeway* (CHAUDHARY et al., 2004):

Figura 8 - Distância de aceleração



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

4.1.4 Localização da linha de parada

A linha de parada representa o ponto limite até onde os veículos podem avançar dentro da rampa de acesso para aguardar o semáforo liberar seu acesso à via principal. De acordo com a literatura, representa o que se denomina divisor entre os segmentos à montante e jusante da rampa. O requisito que deve ser cumprido ao delimitar-se o local da linha de parada é a distância segura para estoque de veículos à montante da linha e de aceleração e entrada na via principal à jusante (BURLEY; GAFFNEY, 2013; CALTRANS, 2014).

4.2 EQUIPAMENTOS E SINALIZAÇÃO

De acordo com Mizuta et al. (2014),

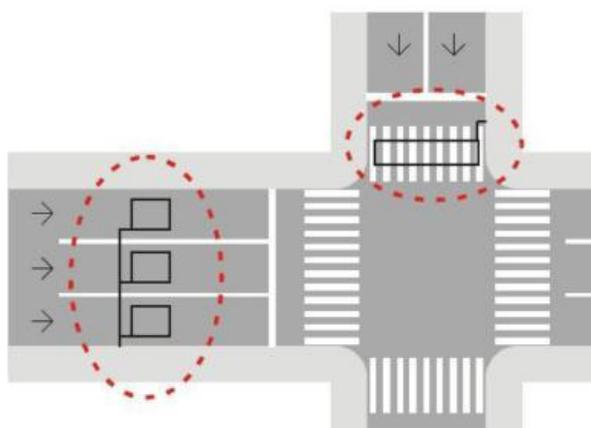
Ramp meter requer alguns componentes e equipamentos essenciais para operar de maneira segura e eficiente. Configuração, comunicação e segurança são objetivos que as agências reguladoras devem considerar quando alocando sinais semafóricos, detectores e placas de sinalização.

A sinalização necessária para a implantação de um sistema de controle como *ramp metering* auxilia na sua eficiência. A possibilidade de o usuário sentir-se confuso vai de encontro com o bom funcionamento da ferramenta, e é ainda mais relevante quando não se possui familiaridade de experiências anteriores, como é o caso no Brasil. Portanto, para os nossos objetivos, deve-se atentar de maneira especial para a sinalização e controle na rampa de acesso.

4.2.1 Detectores

Os detectores são dispositivos responsáveis por detectar a demanda de tráfego, sendo esta composta por veículos motorizados, não motorizados e pedestres, apesar de que, para o *ramp metering*, somente são considerados os veículos motorizados. Existem diversos tipos diferentes de detectores, como laços indutivos, botoeiras, laços virtuais por tratamento de imagem, detectores por micro-ondas, detecção magnética, por radiação infravermelha e ultrassônica. O tipo de dispositivo é escolhido de acordo com os objetivos e especificidades determinados pela entidade responsável (CONTRAN, 2014). No caso do *ramp metering*, o número e funções de detectores necessários para o sistema variam conforme as especificações de cada aplicação. Por exemplo, quando usado o sistema de Tempos Fixos, o ciclo do semáforo é baseado em dados históricos e, portanto, não há consideração do fluxo de veículos na via principal. Com isso a alocação de um detector para medir fluxo na via principal é desnecessária.

Figura 9 - Detector por laço indutivo



(fonte: CONTRAN, 2014)

A função de cada detector relaciona-se com sua função no sistema. Quando não há norma reguladora para *ramp metering*, como é o caso do Brasil, a localização e necessidade de cada detector devem ser verificadas pela agência responsável. Os principais locais de instalação de detectores encontrados na literatura são (CALTRANS, 2016; CHAUDHARY et al., 2004; JACOBSON et al., 2006; SEUNGMIN; GILLEN, 1999):

Tabela 3 - Principais detectores usados

Nome	Local	Função
Fila na rampa	Próximo à interseção entre rampa e via arterial (pontos extras no meio da rampa podem ser adicionados)	Determinar uso da capacidade do estoque de fila
Via Principal	Na via principal. Pontos variam de acordo com sistema de <i>ramp metering</i> , podendo ser montante e/ou jusante da interseção da via principal com a rampa de acesso	Determinam o fluxo e ocupação da via principal, em alguns casos outros dados como velocidade. Essencial para sistemas responsivos de <i>ramp metering</i>
Demanda	Montante da linha de parada	Determinar presença de veículos e iniciar a operação de <i>ramp metering</i>
Passagem	Jusante da linha de parada	Determinar número de veículos ingressando na <i>freeway</i>

(fonte: elaborado pelo autor)

4.2.2 Semáforos

O semáforo localiza-se geralmente à esquerda dos motoristas (CHAUDHARY et al., 2004). Sua disposição pode ser com três lentes, de cores vermelha, amarela e verde, ou com duas lentes, de cores vermelha e verde (MIZUTA et al., 2014). No Texas, a prática comum indica o uso de dois semáforos, um de cada lado da pista, conforme Figura 10 abaixo:

Figura 10 - Sinalização do *ramp metering*

(fonte: Chaudhary et al., 2004)

Figura 11 - Sinalização semafórica

TIPO DO SEMÁFORO	POSIÇÃO VERTICAL	POSIÇÃO HORIZONTAL
Veicular	<p>Observação: O grupo focal pode ser configurado com vermelho 300mm e amarelo/verde 200mm</p>	<p>Observação: Só utilizar quando projetado sobre a via</p>

(fonte: adaptado de CONTRAN, 2014)

4.2.3 Placas e marcações

Por tratar-se de um sistema desconhecido para o público brasileiro, o fornecimento de informações para o usuário final se torna parte crítica para um bom funcionamento de qualquer *ramp meter* a ser instalado no Brasil. Esses dados que visam orientar o usuário final desdobram-se em placas, letreiro fixo ou digital, e marcações na pista. Com a falta de especificação para *ramp meters*, o CONTRAN (2007) orienta sobre a necessidade de placas de advertência frente a um semáforo.

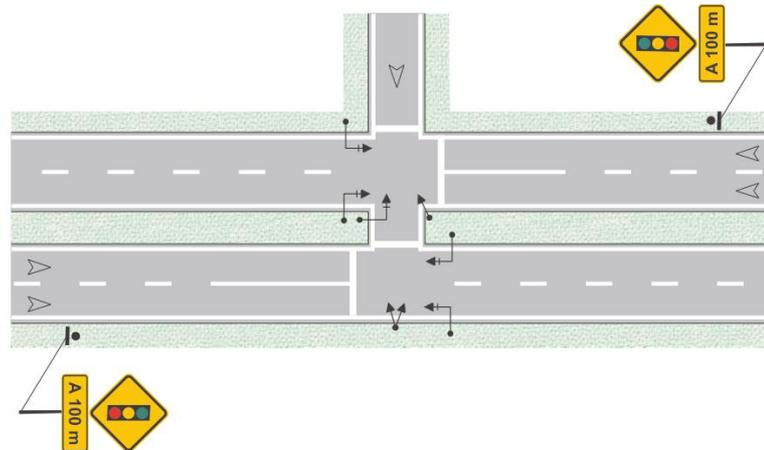
Figura 12 - Placa de advertência



(fonte: CONTRAN, 2007)

Essa placa deve ser posicionada, preferencialmente, ao lado direito da via. Para vias expressas, a placa deve acompanhar os dizeres “A ___m”, a no mínimo 300 metros de distância e se repetindo até os 100m (CONTRAN, 2007).

Figura 13 - Sinalização de advertência



(fonte: CONTRAN, 2007)

Em adição à especificação do CONTRAN, a experiência internacional apresentada na literatura faz uso de mais algumas placas de sinalização, como:

Tabela 4 - Placas comuns de sinalização

Placa	Localização	Aplicação
	À esquerda da via arterial, cerca de 60 metros à montante do ponto de acesso da rampa	O sinal é acompanhado de uma luz piscante amarela para alertar motoristas da rampa controlada a frente
	Posicionada junto ao poste de semáforo de controle da rampa, abaixo deste	Utilizado para identificar o ponto da linha de parada e garantir que usuários parem em cima do detector de demanda
	Posicionado junto à placa de "parar aqui quando vermelho" ou junto do poste de semáforo	Informar motoristas a respeito da liberação de fluxo utilizada naquela rampa de acesso
	Junto ao poste de semáforo correspondente da faixa	Identificar a sinalização correta e informar motoristas a respeito do controle operado na rampa
	Posicionado próximo ao começo da fila tornar-se de faixa dupla	Transformar uma rampa de acesso com uma faixa em uma fila com estoque dividido em duas faixas

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

Marcações no pavimento são comumente utilizadas para alertar pista exclusiva para veículos de alta ocupação (HOV – do inglês *High Occupancy Vehicle*). Ademais, uma seta indicando a direção e entrada da rampa de acesso e faixa para linha de parada também são indicados (CALTRANS, 2016).

4.3 ALGORITMOS

Algoritmos são a lógica utilizada pelo sistema de *ramp metering* para determinar a duração do ciclo do semáforo de liberação da rampa. Existem duas divisões principais: de controle local e controle do sistema. Controle local considera a situação nas proximidades da rampa de acesso enquanto que o algoritmo coordenado reflete condições mais abrangentes, podendo levar a um funcionamento conjunto das rampas que atuam na mesma via (MIZUTA et al., 2014).

4.3.1 Controle Local

4.3.1.1 Tempos fixos

Para este cenário os ciclos utilizados para o semáforo de controle são pré-programados e estimados em concordância com dados históricos de demanda. Para esse processo assume-se então uma boa previsibilidade de condições do tráfego e que esse padrão de comportamento se repetirá. Existe para esse sistema a vantagem de baixo custo de implantação e em contrapartida a falta de flexibilidade perante situações atípicas (SEUNGMIN; GILLEN, 1999).

4.3.1.2 Responsivo

Quando não se pode confiar na repetitividade da demanda, o modelo responsivo opera considerando condições do tráfego obtidas no local e em tempo real. Os tempos dos ciclos semaforicos são então calculados baseando-se em demanda da rodovia principal e também das condições na rampa de acesso.

4.3.2 Controle Coordenado

A interdependência desse sistema unida ao objetivo de redução de congestionamentos na *freeway* pode inclusive priorizar outra rampa em detrimento daquela que a lógica analisa. Esse tipo de algoritmo vem sendo desenvolvido e atualmente pode ser subdividido em três (BERTINI, 2016):

4.3.2.1 Cooperativo

É calculada uma taxa de liberação local e este resultado é avaliado como sendo crítico para a capacidade da rodovia ou não. Em caso de demanda muito alta na rampa atual, geralmente reduz-se a taxa de liberação de veículos da rampa à montante.

4.3.2.2 Competitivo

Este cenário baseia-se na premissa de maior importância de uma rampa em comparação às demais. Com isso, para esta rampa é calculada e implantada a taxa mais restritiva a fim de evitar um colapso total do sistema.

4.3.2.3 Integral

Este método opera calculando todas as taxas ótimas de liberação com visão local e depois compara os resultados obtidos sob a ótica do melhor para o sistema. O objetivo da comparação seria de encontrar a melhor solução conjunta das taxas de liberação nas rampas. Ferramentas como programação linear são comumente utilizadas para essa função.

5 METODOLOGIA

5.1 SIMULAÇÃO

Com o desenvolvimento de métodos de simulação de tráfego tornou-se possível a modelagem de sistemas de controle ativo de tráfego para condições desejadas sem os onerosos custos de implantação e testes. Esses modelos de simulação auxiliam a entidade responsável quanto a melhor abordagem a ser designada a fim de melhorar as condições do tráfego (MIZUTA et al., 2014).

5.1.1 VISSIM

VISSIM é um *software* alemão de microsimulação de trânsito. Por se tratar de uma ferramenta computacional, ele permite criar cenários complexos e também uma maior facilidade na obtenção de dados para análise externa. Em contrapartida, exige um trabalho mais extenso quanto à aproximação dos cenários no *software* com as condições do tráfego encontradas na realidade (CHAUDHARY et al., 2004; ZECHIN, 2016).

5.1.1.1 Calibração do microsimulador VISSIM

A calibração do VISSIM para este trabalho foi feita de acordo com os estudos realizados por Caleffi (2013), também para a BR-290. Neste estudo buscou-se identificar os parâmetros mais relevantes dentro do VISSIM e seus respectivos valores de modo a criar um modelo o mais semelhante possível com os dados obtidos diretamente da via.

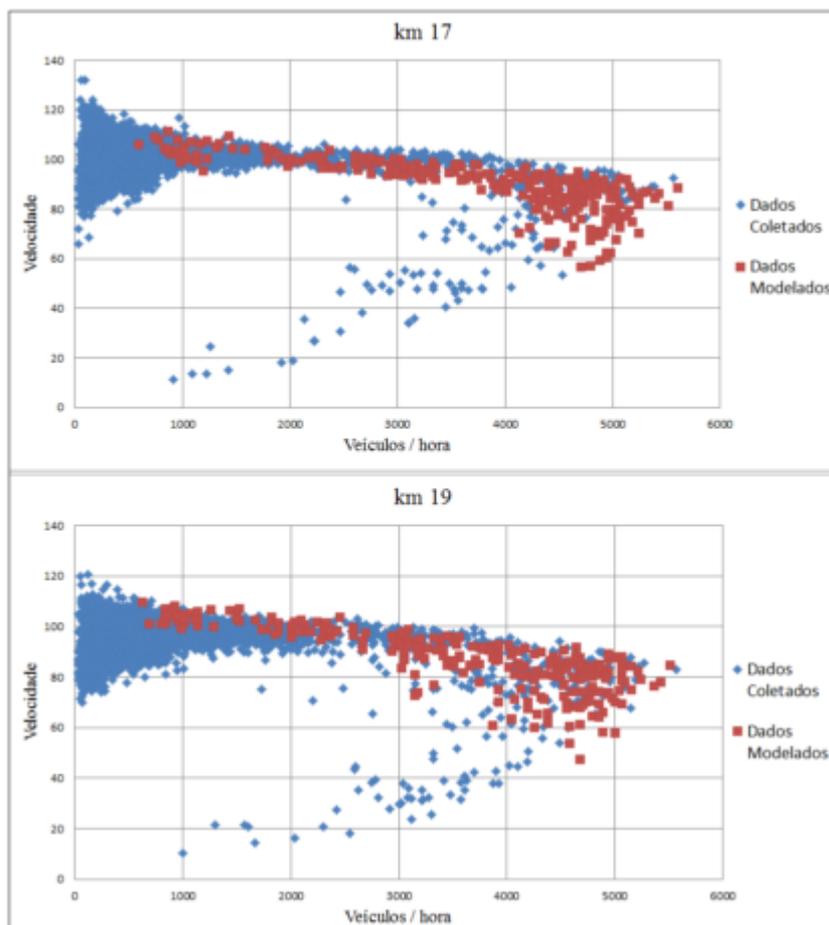
Por se tratar de um software de simulação, exige-se que certos parâmetros sejam calibrados para que se tenha, de fato, uma representação coerente do que se encontra na via. A configuração padrão de muitos microsimuladores, por exemplo, distribui uniformemente entre faixas da via as velocidades e composição de tráfego, o que se mostrou incoerente com o encontrado por Caleffi (2013) através de contadores e detectores na BR-290.

A primeira alteração no estudo em relação à configuração padrão do simulador foi para adequar o perfil de veículos presentes na via para adequar-se à realidade brasileira, através da mudança da distribuição de velocidade e potência dos veículos. Posterior ao ajuste dos veículos procedeu-se para os padrões de comportamento dos condutores, processo que foi

dividido em três etapas: (1) análise de sensibilidade; (2) análise combinatória; (3) validação dos dados através de função objetivo. Entraram nessa análise de comportamento os parâmetros de *car following* e troca de faixas, ambos identificados como críticos, baseando-se em experiência encontrada na literatura. No VISSIM, existem parâmetros que regulam o comportamento dos condutores referente à troca de faixas, enquanto que para *car following* o VISSIM utiliza o modelo Wiedemann-99, que possui 10 parâmetros ajustáveis.

A análise de sensibilidade buscou identificar os parâmetros com impacto no modelo e que deveriam, portanto, receber calibração. A partir da determinação dos parâmetros e faixas de valores para cada um deles, procedeu-se para a análise combinatória destes, a fim de determinar todas as possibilidades de valores entre eles. Para a análise de adequação foi utilizada uma função *Fitness* responsável por medir o erro entre as velocidades médias obtidas através do modelo computacional calibrado e os dados obtidos através de contadores na via. Para quem apresentar interesse em simuladores de tráfego, recomenda-se a leitura do trabalho de Caleffi (2013).

Figura 14 - Gráficos de fluxo e velocidade comparando dados simulados e coletados na BR-290

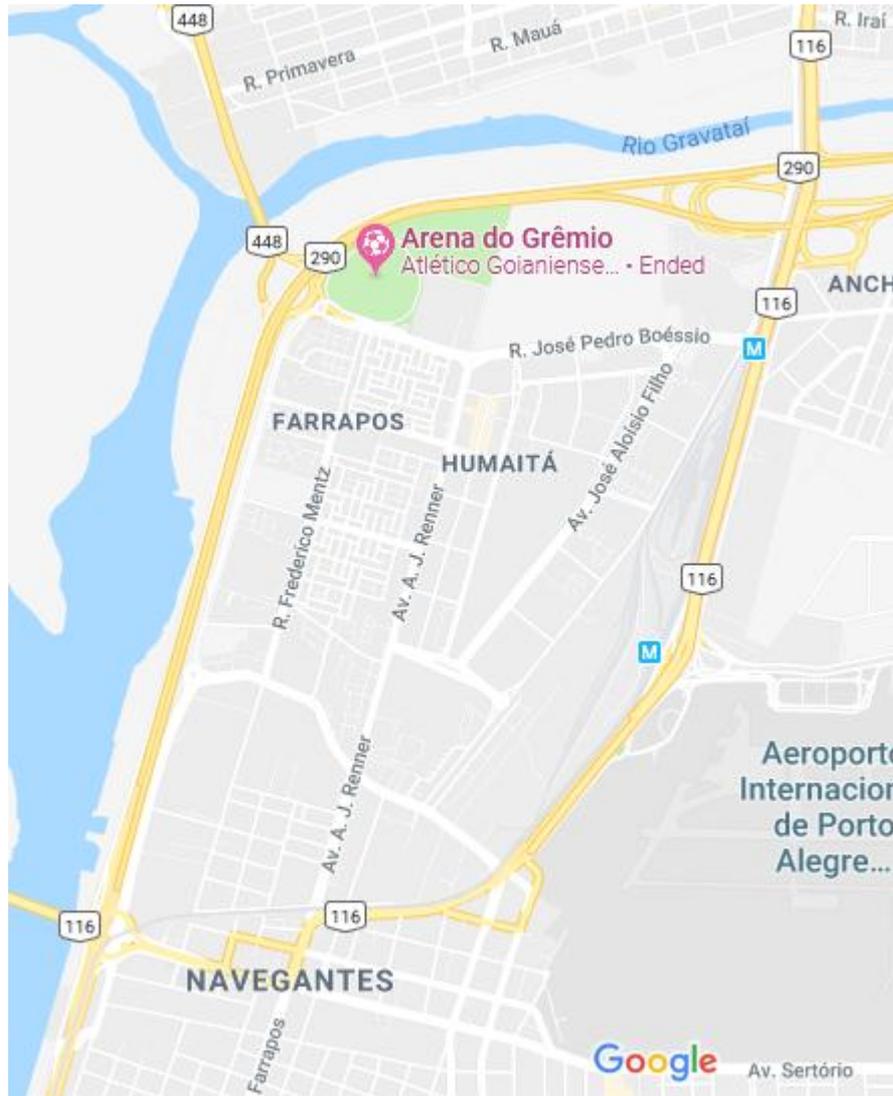


(fonte: Caleffi, 2013)

5.2 TRECHO ANALISADO

O cenário utilizado compreende a BR-290, da sua interseção com a BR-116 e após a interseção com a atual ponte sobre o rio Guaíba, que conecta Porto Alegre e Eldorado do Sul. Este cenário em análise foi construído no VISSIM, incluindo projeto geométrico e demanda de veículos, de acordo com o estudo realizado por Kappler (2017) com intuito de prever os impactos da nova ponte sobre o tráfego no local.

Figura 15 - Trecho analisado (sem ponte nova, em construção)



(fonte: Google Maps)

Figura 16 - Traçado utilizado para nova ponte do Guaíba



(fonte: adaptado de Kappler, 2017)

No simulador, o modelo foi construído para os dois sentidos da via e para englobar a nova ponte sobre o rio Guaíba. Para a representação da nova ponte utilizou-se o projeto geométrico fornecido pela empresa Queiroz Galvão. Assim, o modelo contém três acessos sobre os quais serão aplicados *ramp metering*, todos no sentido Porto Alegre: (1) interseção da BR-448; (2) veículos oriundos da nova ponte do Guaíba em direção a Porto Alegre; (3) veículos oriundos da atual ponte do Guaíba.

Conforme Kappler (2017):

A rede compreende a BR-116/290-RS com início em Eldorado do Sul, incluindo a Travessia Régis Bittencurt, até sua bifurcação. Contempla a BR-290, até sua interseção com a BR-116; a BR-448 (até sua interseção com a BR-386); a avenida Sertório (até sua ligação com a avenida Assis Brasil); e a avenida da Legalidade e da Democracia (desde a rodoviária de Porto Alegre até a saída para a BR-448). O trecho completa-se com a segunda Ponte do Guaíba.

5.2.1 Demanda e rotas

A demanda estimada para o VISSIM foi obtida através de contadores instalados na BR-290 e fornecidos pela CONCEPA. Os dados partem do ano 2007, entretanto, somente foram utilizados os valores entre os anos 2013 e 2017. A tabela abaixo, elaborada por Kappler (2017), representa os dados obtidos:

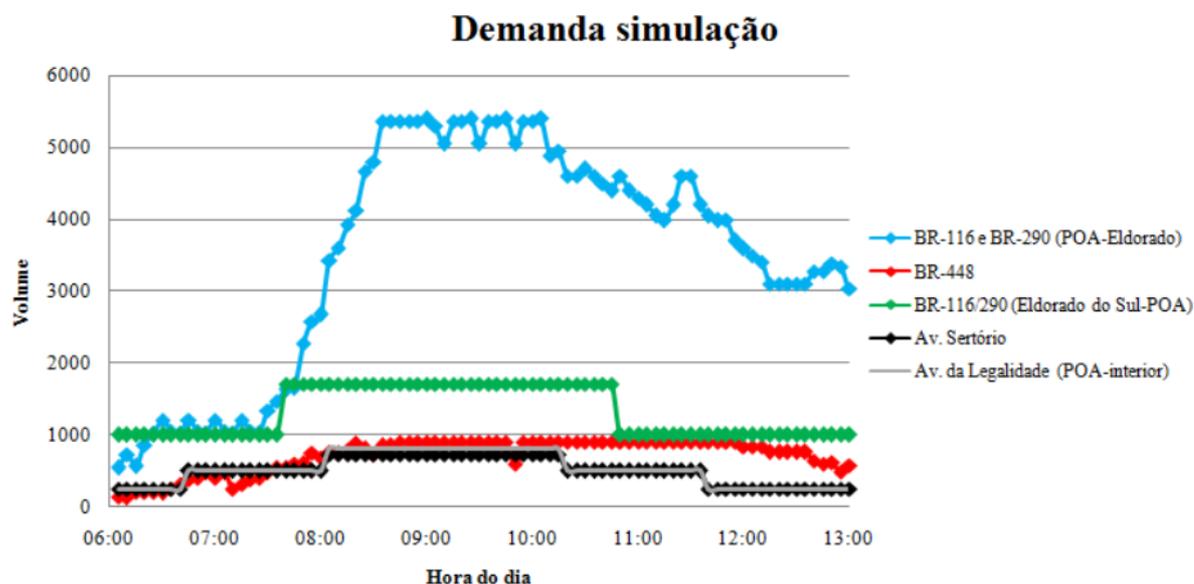
Tabela 5 - Volumes obtidos em pontos de coleta da BR-290

Localização	Sentido	Volume diário médio (nº veículos/dia)	Período
Km 94	Sul (capital-interior)	64,5 mil (dias úteis)	2013 a 2017
Km 95	Norte (interior- capital)	55 mil (dias úteis)	2013 a 2016
Km 96	Norte (interior- capital)	70 mil (dias úteis)	2013 a 2017
Km 98	Norte (POA-Eldorado)	26,7 mil (dias úteis)	2016 a 2017
Km 98	Sul (Eldorado-POA)	27,3 mil (dias úteis)	2016 a 2017

(fonte: Kappler, 2017)

São cinco os pontos de entrada de demanda para o trecho do simulador. Na interseção entre BR-290 e BR-116, sentido interior-capital. Na rodovia BR-448, também no sentido interior-capital. Dois pontos oriundos da cidade de Porto Alegre, um deles da Avenida Sertório e outro da Avenida da Legalidade e Democracia. O último ponto de demanda é em Eldorado do Sul, no sentido Porto Alegre. No gráfico abaixo de Kappler (2017) é representada a demanda introduzida em cada ponto da simulação ao longo do tempo.

Figura 17 - Perfil de demanda ao longo do tempo introduzido na simulação



(fonte: Kappler, 2017)

Através dos dados obtidos, concluiu-se que dos condutores oriundos de Eldorado do Sul, sentido Porto Alegre, 33% dirigem-se a Porto Alegre através da Avenida da Legalidade e Democracia, 33% à BR-290 para o interior do estado e 34% acessam a Avenida Sertório para ingressar em Porto Alegre. Na BR-290, dos 55 mil veículos que trafegam no sentido interior-capital, 18% entra na atual Ponte do Guaíba.

Por não terem sido obtidos dados de Origem-Destino, as rotas realizadas pelos condutores que não puderam ser comprovadas a partir dos contadores tiveram de ser inferidas. Além disso, com a introdução da nova ponte sobre o rio Guaíba, premissas adicionais sobre rotas foram realizadas para simular o comportamento dos condutores, conforme segue abaixo:

- a) Os veículos que utilizavam a ponte atual, com destino às rodovias BR-290 e BR-448 passam a utilizar a nova ponte (33%), com um acréscimo devido à utilização da nova ponte para acessar Porto Alegre pela 3ª Perimetral. Estimou-se, então, que 40% do fluxo de veículos oriundos de Eldorado do Sul no sentido Porto Alegre passam a utilizar a nova ponte;
- b) Os destinos daqueles motoristas que passam a utilizar a ponte nova no sentido Eldorado do Sul-Porto Alegre podem ser representados por: 15% voltam para Porto Alegre através da BR-290, 50% procedem em direção BR-290 e 35% acessam Porto Alegre através da 3ª Perimetral;
- c) Todos veículos provenientes de Eldorado do Sul sentido Porto Alegre, pela nova ponte, que se direcionam a Porto Alegre pela BR-290, permanecem na BR-290.

Para manter o trabalho menos complexo e compreender melhor os efeitos do *ramp metering*, foi simulado somente o período das 06h até 14h, que engloba o pico da manhã, responsável pela maior demanda no sentido interior-capital. Em contrapartida manteve-se o cenário completo elaborado por Kappler (2017), mesmo com a introdução de *ramp metering* somente no sentido interior-capital, para ter uma percepção mais global dos efeitos da ferramenta no tráfego de entrada de Porto Alegre. Um detalhamento mais aprofundado do processo de determinação de demanda e rotas escolhidas, podem ser encontrados em Kappler (2017).

5.3 ALGORITMO DE CONTROLE DE RAMPA

O algoritmo utilizado para o controle de liberação de veículos nas rampas de acesso foi de demanda e capacidade. Este método, chamado de DCC (do inglês, *Demand-Capacity Control*), é utilizado como base para muitos outros algoritmos de controle devido à sua transparência e plausibilidade (BERTINI, 2016). É, portanto, um dos primeiros algoritmos introduzidos quando do começo do método responsivo de controle de rampa (SEUNGMIN; GILLEN, 1999).

As taxas de liberação da rampa são calculadas em tempo real, comparando o fluxo de veículos à montante da interseção rampa-via principal e a capacidade à jusante desta interseção. Este

método, então, responde às condições presentes do tráfego e pode ser eficientemente aplicado para combater congestionamentos (CHIEN, 2001). Sua aplicabilidade é comumente estendida com a adição de taxas máximas e mínimas de liberação (BERTINI, 2016), as quais serão discutidas nos capítulos subsequentes.

O algoritmo é calculado da seguinte maneira (BERTINI, 2016; SEUNGMIN; GILLEN, 1999):

$$R(t) = C - I(t - 1) \quad (\text{equação 3})$$

$$c(t) = 3600/R(t) \quad (\text{equação 4})$$

Onde:

$R(t)$ = número de veículos liberados para ingressar na via principal no período t [veí/h];

C = capacidade à jusante da interseção rampa-via principal [veí/h];

$I(t - 1)$ = demanda de veículos à montante do ponto de interseção, na via principal, no período $t-1$ [veí/h];

$c(t)$ = duração do ciclo de *metering* [seg/veí];

A introdução dessa lógica nos semáforos do simulador VISSIM foi feita através de uma ferramenta do próprio VISSIM chamada VAP (do inglês, *vehicle actuated programming*), a qual possibilita a inserção de *ramp metering* levando em consideração condições em tempo real de tráfego (ZECHIN, 2016). Essas taxas de liberação, evidenciadas nas equações acima, eram recalculadas a cada 60 segundos. A capacidade à jusante utilizada para cada algoritmo de cada rampa de acesso, por ser um ponto muito relevante para a lógica do *ramp metering*, encontra-se explicada no capítulo subsequente.

Para controlar o fluxo a ser inserido nas formulações, detectores foram postos em cada faixa, no ponto à montante da interseção entre rampa de acesso e via principal, na via principal (BR-290). Para diminuir a flutuação observada em cada minuto do fluxo de veículos, considerou-se para cada período de cálculo i de um minuto, o número de veículos observados nos três minutos anteriores. Este valor multiplicou-se por 20 para estimar o fluxo horário a ser inserido na fórmula. Desta maneira a variação se tornou mais suave e mudanças abruptas foram diminuídas.

O *ramp meter* detectava, a cada minuto, o fluxo à montante da interseção nos últimos 3 minutos, extrapolava para uma hora e diminuía este valor encontrado da capacidade estimada para o sistema. Se o ciclo calculado estava dentro dos limites, o sinal automaticamente ficaria vermelho e permaneceria vermelho até os últimos dois segundos do ciclo (tempo mínimo de verde), quando ficaria verde em caso de demanda na rampa. Enquanto não fosse detectada demanda na rampa, o sinal permaneceria vermelho até o sistema calcular um ciclo que extrapolasse os limites estimados, desligando então o sinal.

5.3.1 Capacidade

Segundo o Transportation Research Board (2010):

A capacidade de um elemento do sistema é o fluxo horário máximo sustentável com o qual as pessoas ou veículos podem esperar atravessar, de maneira razoável, um ponto ou uma seção uniforme de uma pista ou estrada durante um período de tempo determinado sob condições predominantes da estrada, como ambientais, de trânsito e controle.

Qualquer análise de capacidade deve ser examinada sob condições uniformes do tráfego, de maneira que uma diferença entre elementos da rodovia, como distribuição de veículos ou condições de controle, pode alterar a capacidade para uma mesma via. A capacidade de uma via não é, entretanto, o máximo fluxo de veículos observado. A capacidade é o fluxo de veículos que pode ser alcançado repetidamente para períodos de pico de demanda, enquanto mantidas as expectativas razoáveis dos usuários (TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, 2010).

Para as expectativas dos usuários serem mantidas, deve-se atentar para as condições de serviço do sistema. Um dos principais fatores que impactam a qualidade do serviço de uma rodovia é a velocidade operacional, ou seja, a velocidade com que os usuários podem e conseguem trafegar na rodovia. A capacidade pode, então, ser inferida a partir de gráficos de velocidade e fluxo de veículos para pontos críticos da rodovia.

Para geração dos gráficos e obtenção dos parâmetros de fluxo a serem estimados, foram realizadas 3 rodadas de simulação para o cenário de demanda atual, e a partir deste cenário incrementou-se 8% da demanda até atingir 56%, o equivalente a sete anos de crescimento segundo estudos de Kappler (2017). Foi feita uma rodadas de simulação para cada incremento de demanda. Com os detectores instalados à jusante das interseção, foram coletadas as

informações necessárias e consolidados os dados a cada período de 5 minutos. Os gráficos obtidos podem ser conferidos junto dos demais resultados, no final deste capítulo.

Para este trabalho, outra abordagem de capacidade também foi avaliada. Seguiu-se a ideia de Elefteriadou et al. (2011), que buscou encontrar uma definição para capacidade que representa o volume randômico mais provável de causar um *breakdown* na via, diferente da definição mais usual de capacidade como uma variável constante. A ideia é, então, definir um volume mais provável para a BR-290 com que geralmente o fluxo transita de não congestionado, também chamado de fluxo livre, para congestionado, ou *stop-and-go*, visto que o fluxo para tal é probabilístico e pode ocorrer para diversos valores de demanda.

Os dados obtidos nos estudos de Elefteriadou et al. (2011) foram cedidos por órgãos responsáveis através de coleta por detectores instalados na via. Por ser inviável para nossa realidade, neste trabalho foram obtidos dados através de simulação. Primeiramente, foram colocados detectores à jusante da interseção entre rampas e BR-290, para assim obtermos fluxos e velocidades médias para intervalos de um minuto. Em termos de simulações realizadas, foi adotado o mesmo procedimento que para obtenção dos dados de fluxo e velocidade, com 3 rodadas de simulação da demanda atual e uma para cada incremento de 8% na demanda. Com os dados obtidos e acumulados para cada minuto, foram conferidas as condições para determinar a ocorrência de *breakdown*, as quais se encontram abaixo e devem ser todas encontradas para confirmar o *breakdown* (LU; ELEFTERIADOU, 2013):

- 1) Diferença de velocidade entre dois minutos consecutivos é negativa

$$\Delta S = S_i - S_{i-1} < 0$$

- 2) A média de velocidade dos últimos cinco minutos é pelo menos 16 km/h maior que a média de velocidade dos próximos 5 minutos

$$\text{média} \{S_{i-5}, \dots, S_{i-1}\} > \text{média} \{S_i, \dots, S_{i+4}\} + 16 \text{ km/h}$$

- 3) A velocidade máxima encontrada nos próximos 10 minutos é menor que a encontrada anteriormente à queda de velocidade

$$\text{máximo} \{S_i, \dots, S_{i+9}\} < S_{i-1}$$

Posterior à determinação de evento de *breakdown*, ordena-se a tabela de menor para maior em termos de volume e na segunda coluna se houve ou não *breakdown*. Com estes dados, é aplicado o método de produto limite para criar a curva de probabilidade.

$$F(q) = 1 - \prod_{i:q_i \leq q} \frac{k_i - 1}{k_i} \quad (\text{equação 5})$$

Onde:

$F(q)$ = função de distribuição de volume de *breakdown*;

q = volume de tráfego observado [veí/h/pista];

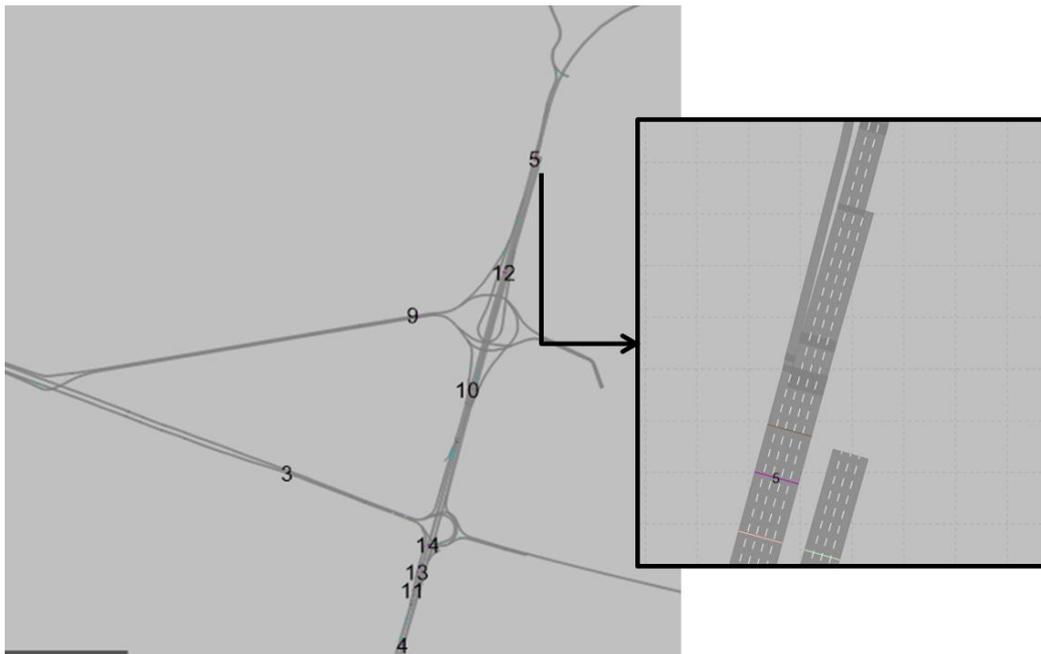
q_i = volume de tráfego observado no intervalo i , anterior à queda de velocidade, i.e., o volume de *breakdown* [veí/h/pista];

k_i = número de intervalos com um volume de tráfego $q > q_i$;

$\{B\}$ = intervalo de dados de *breakdown* (observações por minuto).

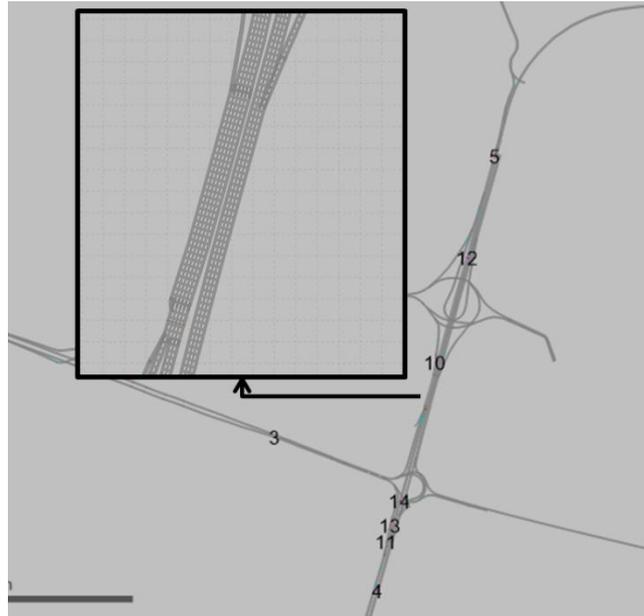
Com estes dados, os gráficos de volume à jusante da interseção e probabilidade de *breakdown* puderam ser gerados. O projeto geométrico, com a localização das rampas, os gráficos gerados de fluxo e velocidade e também de probabilidade de *breakdown* e fluxo seguem abaixo.

Figura 18 - Vista superior do projeto e detalhe para rampa de acesso 1 - BR-448 e BR-290



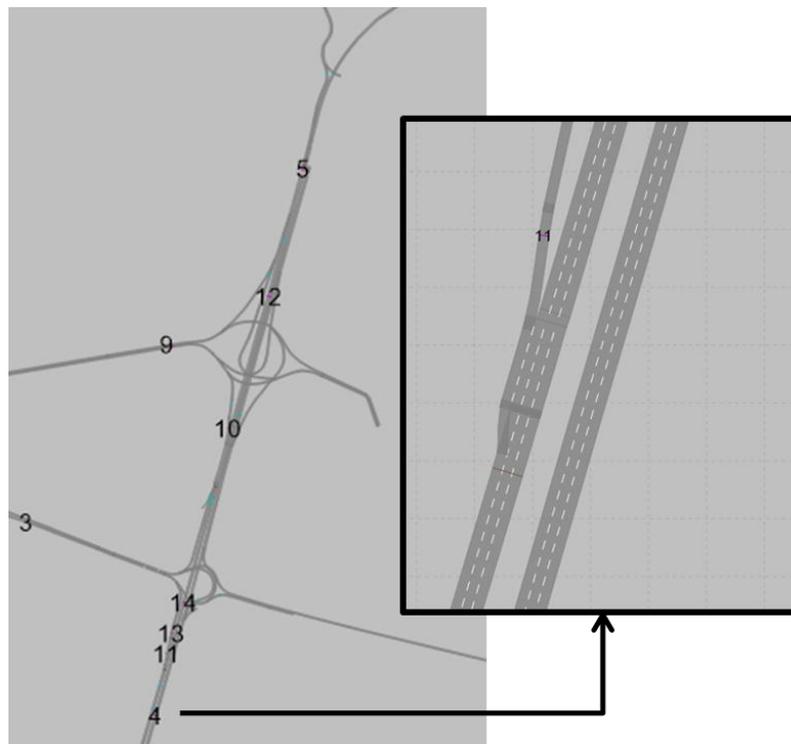
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 19 - Vista superior do projeto e detalhe para rampa de acesso 2 - Ponte nova e BR-290



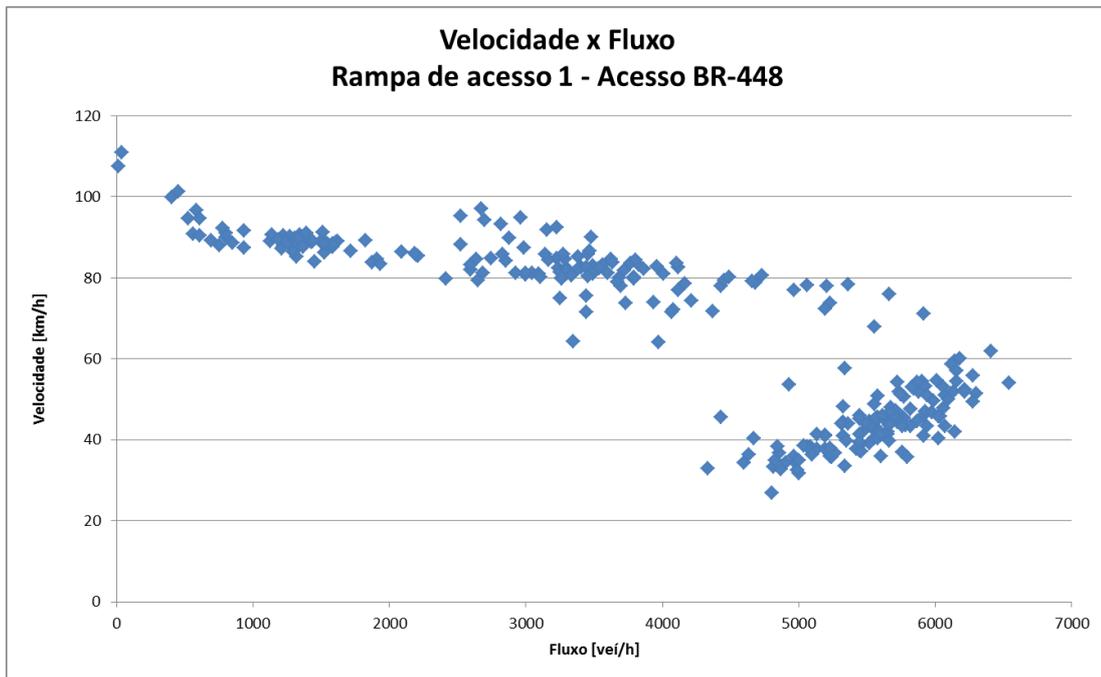
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 20 - Vista superior do projeto e detalhe para rampa de acesso 3 - Ponte atual e BR-290



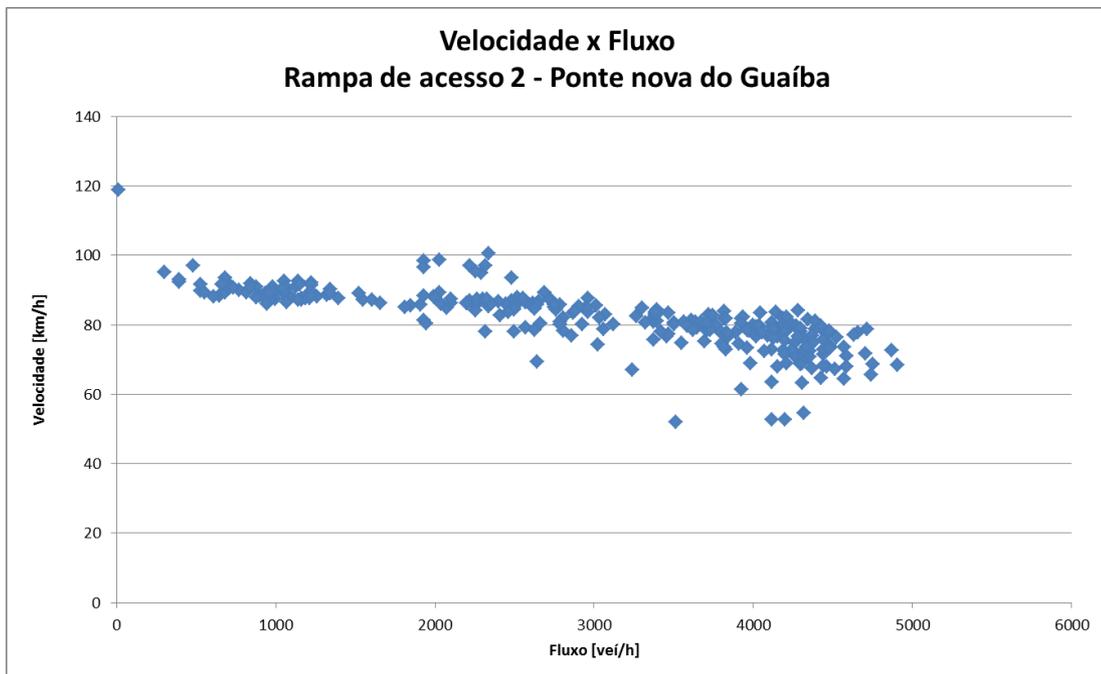
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 21 - Gráfico de Velocidade e Fluxo da Rampa 1



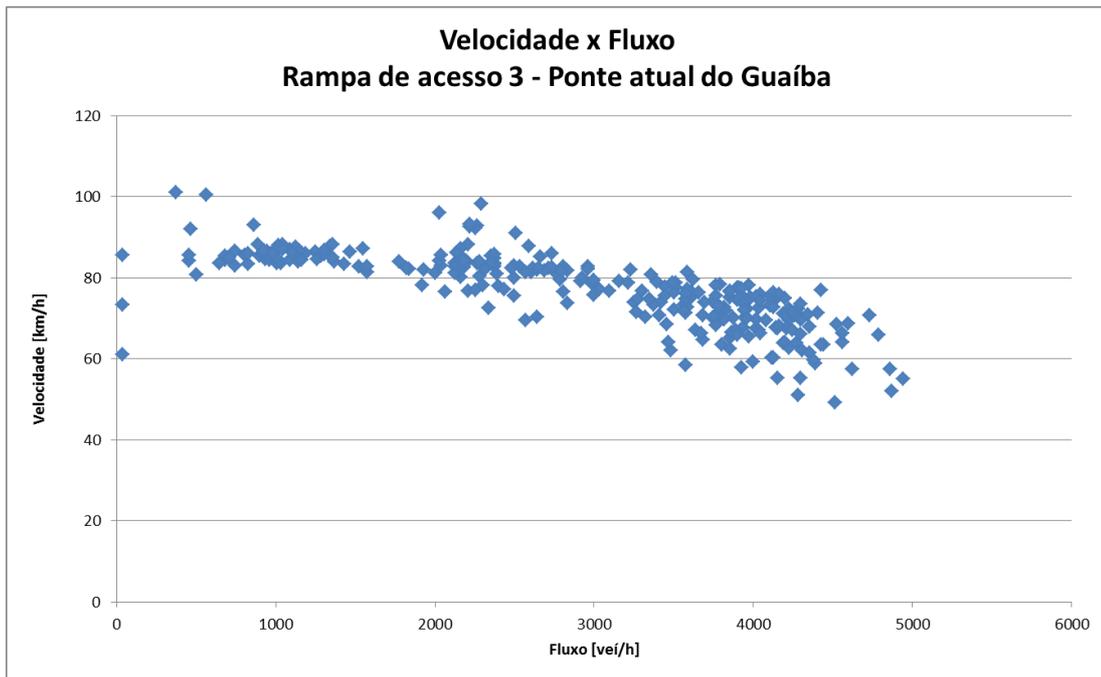
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 22 - Gráfico de Velocidade e Fluxo da Rampa 2

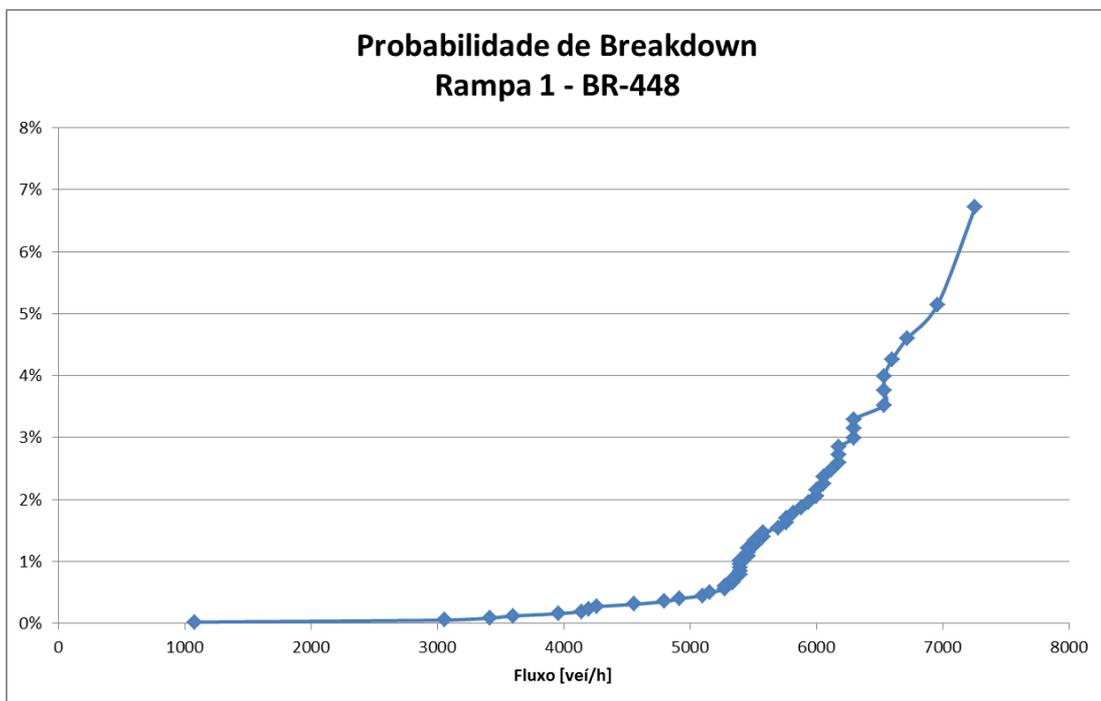


(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 23 - Gráfico de Velocidade e Fluxo da Rampa 3

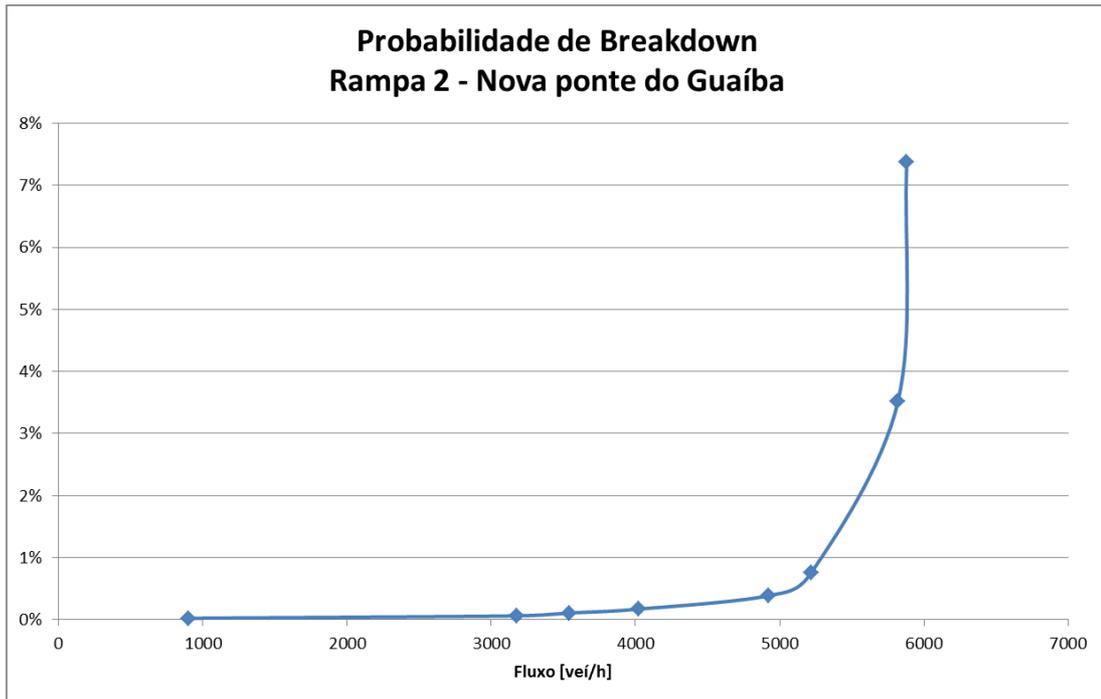


(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 24 - Probabilidade de *Breakdown*

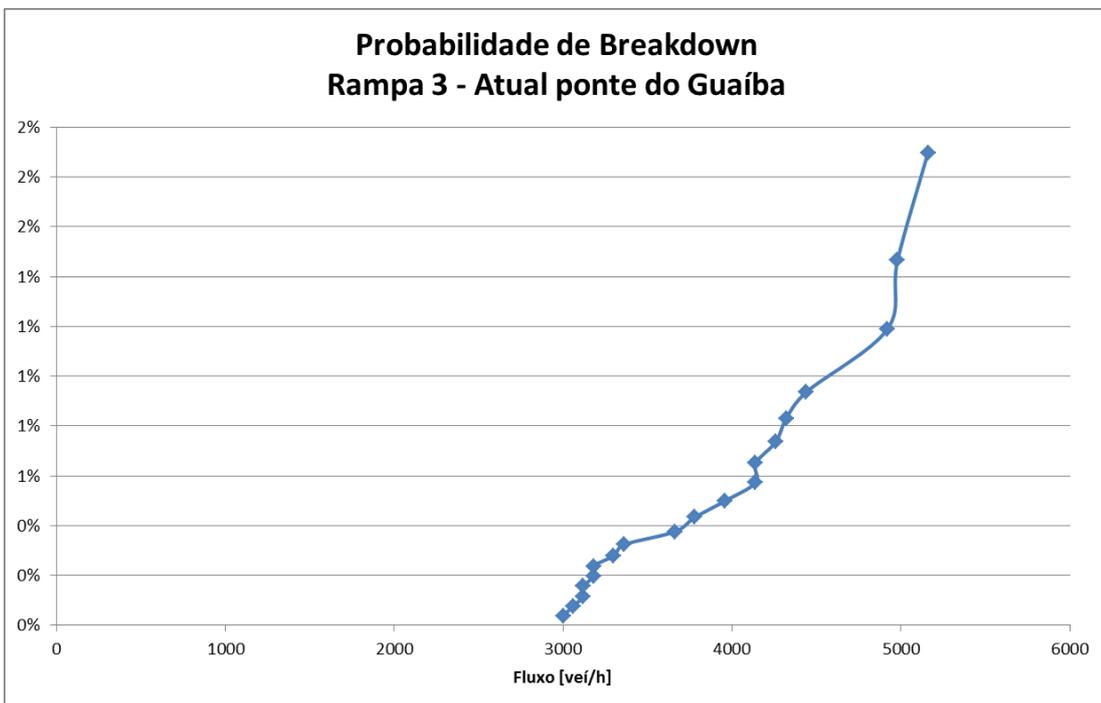
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 25 - Probabilidade de *Breakdown*



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 26 - Probabilidade de *Breakdown*



(fonte: elaborado pelo autor)

Os resultados obtidos de probabilidade de *breakdown* refletem os gráficos de fluxo e velocidade, visto que para as rampas 2 e 3, praticamente sem a parte inferior da nuvem fluxo e velocidade (com altos fluxos e baixas velocidades), não foram obtidos muitos casos de

breakdown. Mesmo extrapolando a demanda de 8 em 8% até 56%, não foi gerada uma queda no fluxo de veículos e efeitos de queda na velocidade para essas duas rampas. Para a rampa 1 as probabilidades obtidas não extrapolaram a casa dos 7%, o que pode indicar que eventos de *breakdown* não são tão previsíveis e/ou comuns na seção à jusante da interseção da rampa da BR-448 e BR-290. Uma hipótese a ser verificada é de *breakdown* à montante da interseção, visto que temos todo o fluxo proveniente da BR-116 e BR-290 passando por 3 pistas, enquanto que posterior à interseção a via é ampliada para 5. Segundo Elefteriadou (2011), ótimas probabilidades para escolha de capacidade da via estão entre 15 a 20%, e por isso optou-se por não utilizar os valores de fluxos obtidos através desse método como estimativa para capacidade das vias.

Os valores de capacidade inseridos nos algoritmos das rampas foram, então, obtidos dos gráficos de fluxo e velocidade através de estimação na nuvem de pontos. Buscou-se escolher valores que representassem uma grande densidade de pontos para os volumes mais altos.

Tabela 6 - Capacidades à jusante adotadas nos algoritmos de ramp metering

Designação Rampa e Interseção	Capacidade [veí/h]
Rampa 1 - Interseção BR-448 e BR-290	5500
Rampa 2 - Interseção ponte nova Guaíba e BR-290	4350
Rampa 3 - Interseção atual ponte Guaíba e BR-290	4150

(fonte: elaborado pelo autor)

5.3.2 Taxas máximas e mínimas de liberação

Com base em experiências já desenvolvidas, a Highways Agency (2007) recomenda os valores contidos na tabela abaixo para implantação de tempos e volumes no *ramp metering*:

Tabela 7 - Valores recomendados para implantação de *ramp metering*

Parâmetro	Valor Mínimo		Valor Máximo	
	Ideal	Aceitável	Ideal	Aceitável
Velocidade média na via principal na região do acesso (km/h)	Sem valor mínimo		70	
Delay 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)

Para as lógicas inseridas no VAP em cada *ramp metering*, foi considerado o volume máximo a ser liberado na pista principal pela rampa de 900 vph e mínimo de 400 vph, o que representa limites de ciclo de 4 segundos por veículo e 9 segundos por veículo a serem liberados na rampa. Valores de ciclo calculados fora destes limites automaticamente desligam o sistema.

5.4 INSERÇÃO DO *RAMP METERING* NA VIA DE ACESSO – ASPECTOS GEOMÉTRICOS

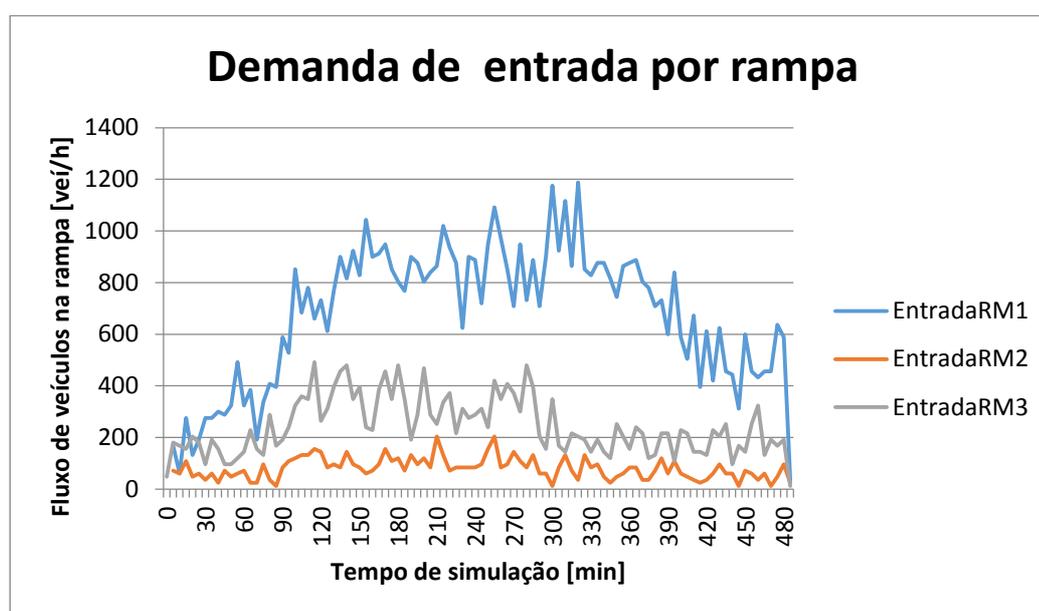
Conforme explícito no capítulo 4.1, existem certos parâmetros geométricos observados e recomendados pela experiência internacional. Entretanto, conforme limitação já explicitada no trabalho, não seria alterada a infraestrutura vigente para aplicação do controle de acesso à rampa. O fluxo máximo de veículos foi observado através de simulação e seus valores encontram-se na tabela abaixo.

Tabela 8 - Demanda de pico por rampa

Rampa de acesso	Demanda de pico na rampa [veí/h]
Rampa 1 - Interseção BR-448 e BR-290	1188
Rampa 2 - Interseção ponte nova Guaíba e BR-290	204
Rampa 3 - Interseção atual ponte Guaíba e BR-290	492

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 27 - Gráfico de demanda em cada rampa pelo tempo



(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 9 - Comprimento de Fila [m]

Comprimento de Fila	Chaudhary et al.	CALTRANS	Pista Simples	Escolhido	
				Pista Dupla	Final
Rampa 1 - Interseção BR-448 e BR-290	630	735	87	200	487
Rampa 2 - Interseção ponte nova Guaíba e BR-290	157	126	40	220	480
Rampa 3 - Interseção atual ponte Guaíba e BR-290	344	304	60	194	448

(fonte: elaborado pelo autor)

Observou-se que a velocidade de interseção para as rampas girava em torno de 80 km/h, enquanto ainda em condições de não congestionamento. Esses valores foram colocados no gráfico de Chaudhary et al. (2004) para 0% de greide e a tabela abaixo foi construída:

Tabela 10 - Distância de aceleração

Distância de aceleração	Chaudhary et al	CALTRANS	Pista Simples	Escdido	
				Pista Dupla	Final
Rampa 1 - Interseção BR-448 e BR-290	80	237	170	nova pista para ingressantes	-
Rampa 2 - Interseção ponte nova Guaíba e BR-290	80	237	70	190	260
Rampa 3 - Interseção atual ponte Guaíba e BR-290	80	237	110	20	130

(fonte: elaborado pelo autor)

5.5 CENÁRIOS ANALISADOS

Para melhor interpretação dos resultados a serem obtidos, optou-se por utilizar três cenários para as simulações. Cada cenário foi simulado em 3 rodadas de simulação para garantir a aleatoriedade dos acontecimentos. Os cenários encontram-se descritos abaixo:

- 1) Cenário 0: representa o trecho como ele irá se encontrar quando a ponte nova sobre o rio Guaíba estiver concluída, sem nenhum *ramp metering* instalado e demanda atual.
- 2) Cenário 1: assim como o Cenário 0, com exceção de um *ramp metering* instalado no acesso da rodovia BR-448 à BR-290.
- 3) Cenário 2: também representa o trecho como ele irá se encontrar quando a ponte nova sobre o Guaíba estiver concluída e demanda atual. Foram inseridos controle nas rampas através de *ramp metering* nas junções da BR-290 com a BR-448, Ponte nova e Ponte atual.

Os dados analisados para compreender os efeitos dos *ramp meters* foram tempos de viagem dos veículos que trafegam na BR-290, desde antes da interseção com a BR-448 até passarem pela interseção com a atual ponte do Guaíba. Também se buscou entender se houve alguma alteração nas distribuições de volume e velocidade no tempo com a utilização dos controles nas rampas.

6 RESULTADOS

6.1 TEMPOS DE VIAGEM

O tempo de viagem observado é dos condutores que percorreram a via principal (BR-290), desde antes da interseção com a primeira rampa até depois da interseção com a última e terceira rampa de acesso. Também se considerou o atraso – variável denominada *delay* – estimado pelo próprio VISSIM para cada veículo que trafegou por esse trecho. Por se tratar de um algoritmo de demanda e capacidade, foram somados os tempos e atrasos do tempo total de simulação e também do intervalo de funcionamento das rampas, caracterizado por demandas mais altas. O termo *Delay* foi usado diretamente em inglês neste caso por ser o termo do próprio simulador, podendo ser traduzido como atraso. É válido ressaltar que cenário 0 indica nenhum *ramp meter* instalado no simulador, enquanto cenário 1 significa *ramp meter* somente na rampa de acesso 1 (na BR-448) e cenário 2 constitui *ramp meter* instalado em todos os três acessos (BR-448, ponte atual sobre o Guaíba e ponte nova sobre o Guaíba).

Tabela 11 - Resumo dos tempos de viagem e atraso da simulação

Item analisado	Cenário 0	Cenário 1	$\Delta 1-0$	Cenário 2	$\Delta 2-0$
Tempo de Viagem Total [h]	1190	1205	1,26%	1168	-1,85%
Tempo de Viagem - Intervalo [h]	997	1013	1,52%	982	-1,61%
Delay - Total [h]	436	451	3,37%	420	-3,71%
Delay - Intervalo [h]	418	434	3,70%	403	-3,66%

(fonte: elaborado pelo autor)

Observa-se que enquanto o cenário 1, somente com *ramp meter* no acesso da BR-448, apresentou tempos de viagem levemente maiores, o cenário com os três *ramp meters* desenvolveu a relação oposta, com tempos de viagem e atrasos levemente menores, em comparação ao cenário base 0, sem *ramp meter*. Os resultados na tabela referentes ao “intervalo” referem-se ao período dentro do qual houve ativação do sistema de semáforo, compreendido entre os minutos 135 e 410 de simulação. Para os dois cenários com *ramp meter* (1 e 2), esse mesmo período de tempo foi considerado como “intervalo”, visto que ambos cenários apresentaram períodos extremamente similares de ativação dos semáforos para todas rampas. Isto não é coincidência e sim devido ao algoritmo utilizado no simulador, de demanda e capacidade. Como as demandas inseridas nos 3 cenários são as mesmas, o ponto de tráfego mínimo para a ativação do *ramp meter* também coincidiu.

O objetivo de dividir os resultados de tempo de viagem e atraso entre tempo total de simulação e período que os semáforos estavam ativos é observar se um não amenizou o resultado do outro. A coluna $\Delta 1-0$ retrata a variação entre os valores encontrados no cenário 1 (*ramp meter* na BR-448) com 0 (nenhum *ramp meter*), em percentual, usando como denominador o valor do cenário base (cenário 0, sem *ramp meter*). O mesmo vale para a coluna $\Delta 2-0$, alterando somente de cenário 1 para cenário 2 (*ramp meter* nos três acessos). Caso houvesse discrepância entre os resultados da simulação como um todo (Total) e intervalo (Intervalo), as colunas $\Delta 1-0$ e $\Delta 2-0$ deveriam apresentar essa diferença. Entretanto, como se pode perceber, as reduções ou aumento de tempo de viagem e atrasos são sempre similares entre os resultados Totais e Intervalo. Isso pode ser observado, por exemplo, para $\Delta 1-0$, Tempo de Viagem Total e Tempo de Viagem – Intervalo, com valores 1,26% e 1,52%, respectivamente. Isso indica que, em princípio, o controle na rampa não alterou o tempo de viagem da simulação, simplesmente manteve-se a tendência da própria semente aleatória de simulação.

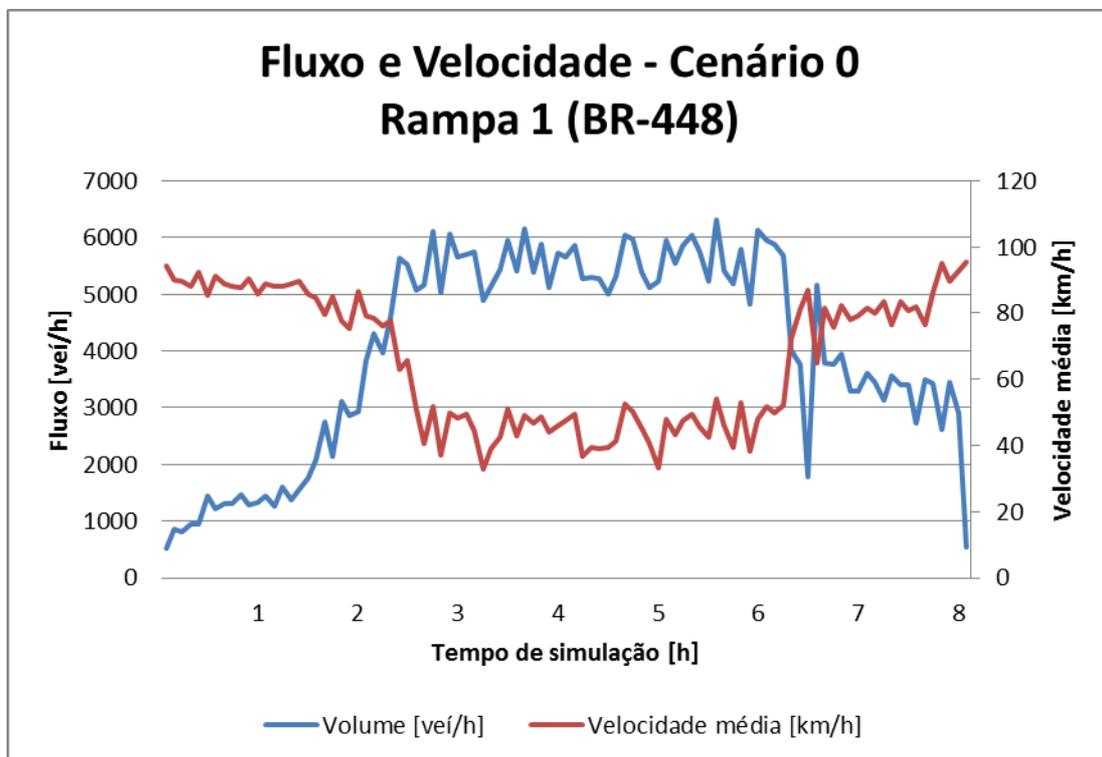
6.2 FLUXO E VELOCIDADE

Uma das premissas do uso de *ramp meters* é a quebra de pelotões entrando na via principal e consequente fluidez maior no fluxo geral da rodovia. Por isso se buscou visualizar o comportamento do fluxo e velocidade no tempo para os cenários analisados, conforme resultados expostos abaixo. Os pontos de coleta foram detectores instalados à jusante da interseção entre rampas e BR-290, conforme indicado na literatura, sendo posterior aos *tapers*.

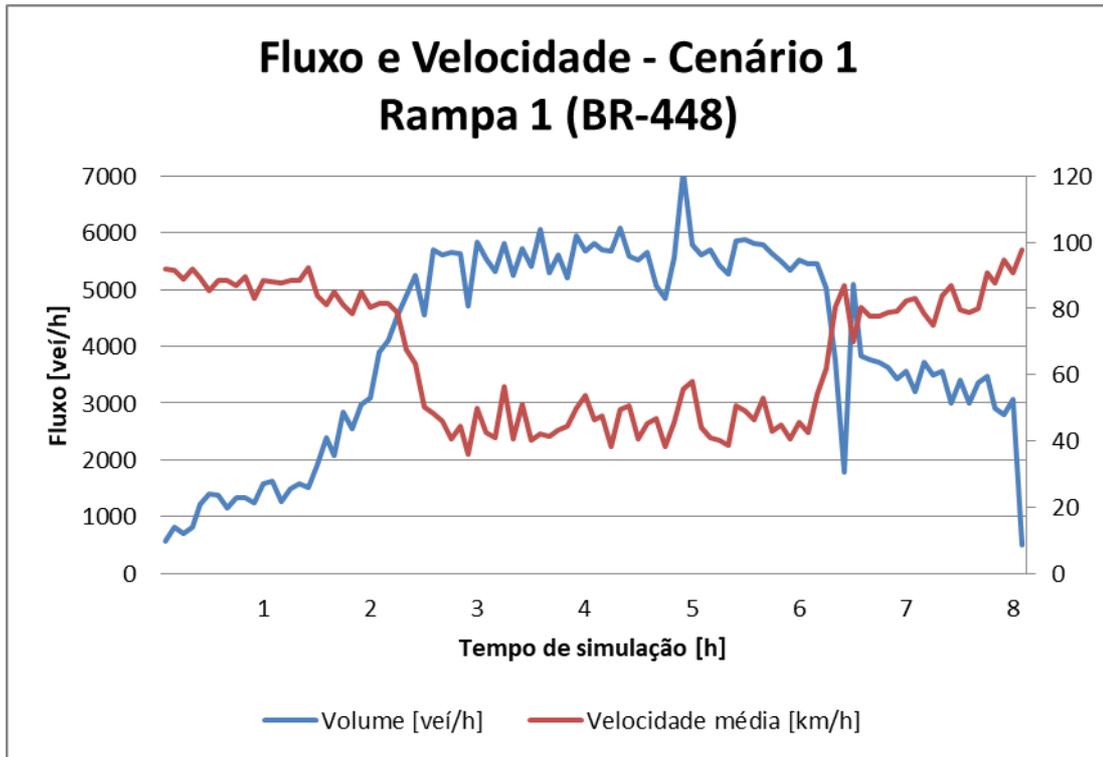
Os primeiros três gráficos abaixo expõem a similaridade corroborada nos resultados de tempos de viagem e atrasos anteriormente debatidos. É possível perceber a brusca queda de velocidade quando o fluxo de veículos oriundos da rampa de acesso e da *freeway* se aproxima de, aproximadamente, 4500 veí/h para todos os cenários. Esse resultado pode estar evidenciando uma limitação do algoritmo Demanda-Capacidade para a realidade da interseção entre BR-290 e BR-448, pois existe um grande fluxo de veículos oriundo da BR-290 que, anteriormente à interseção, possuía 3 faixas e que posteriormente à interseção dispõe de 5. Essa enorme diferença na infraestrutura anterior e posterior à interseção pode ter superestimado a capacidade da via, pois esta foi inferida à jusante, com 5 pistas.

O modelo parte da premissa de utilizar a capacidade estabelecida através de dados obtidos à jusante da interseção por entender que este ponto caracteriza um ponto crítico para o tráfego de veículos. No caso da BR-290, a Figura 21 - Gráfico de Velocidade e Fluxo da Rampa 1, foi utilizada e através dela se estabeleceu que a via comporta um fluxo de veículos de 5500 veí/h e esta foi a capacidade utilizada no algoritmo para controle de acesso na rampa da BR-448. A taxa de veículos na rampa de acesso que inicia o controle do semáforo é 4 seg/veículo, o que gera um fluxo máximo de 900 veí/h liberados na rampa. O semáforo iniciou, assim, quando detectou à montante da interseção, na BR-290, um fluxo de 4600 veí/hora (Capacidade – taxa mínima = 5500 – 900). Como evidenciado pelos gráficos acima, a queda de velocidade inicia para fluxos de cerca de 4500 veí/h à jusante, ou seja, combinando os fluxos oriundos de rampa de acesso e via principal. Podemos inferir, então, que se a queda de velocidades aconteceu para fluxos conjuntos de 4500 veí/h, quando a demanda da *freeway*, à montante da interseção, atingiu patamares de 4600 veí/h, o *breakdown* no tráfego já havia acontecido e, portanto, o semáforo estaria atuando em veículos trafegando em condição de congestionamento.

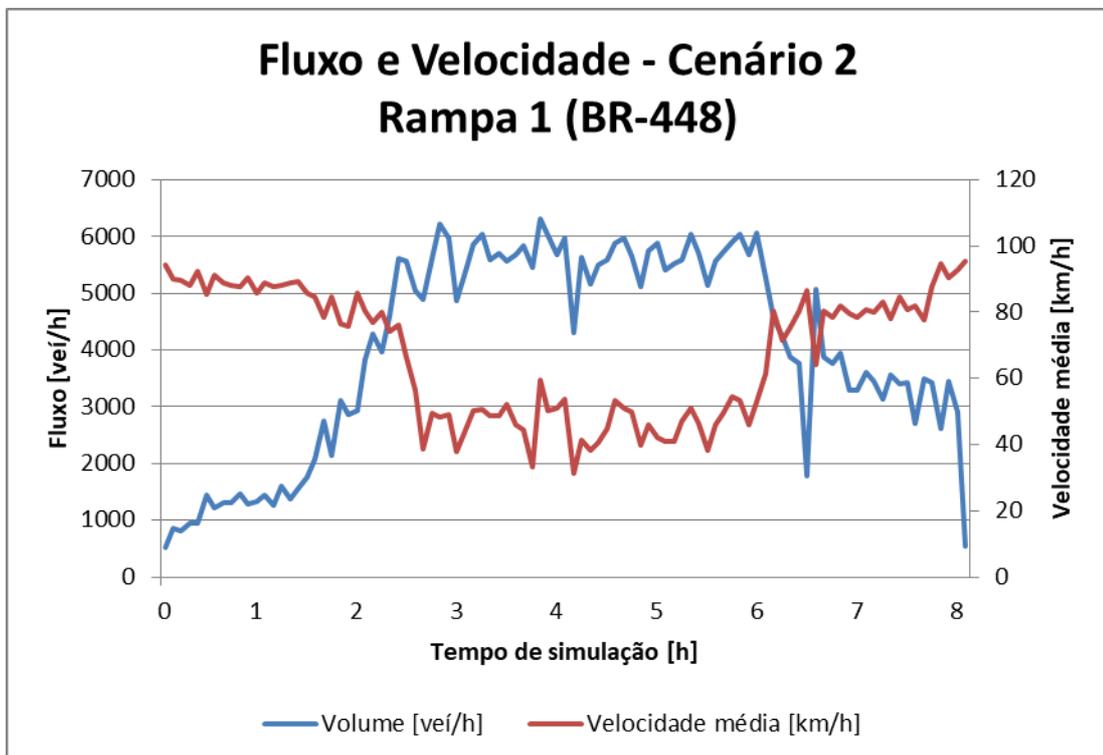
Figura 28 - Fluxo e Velocidade no tempo sem *ramp metering*



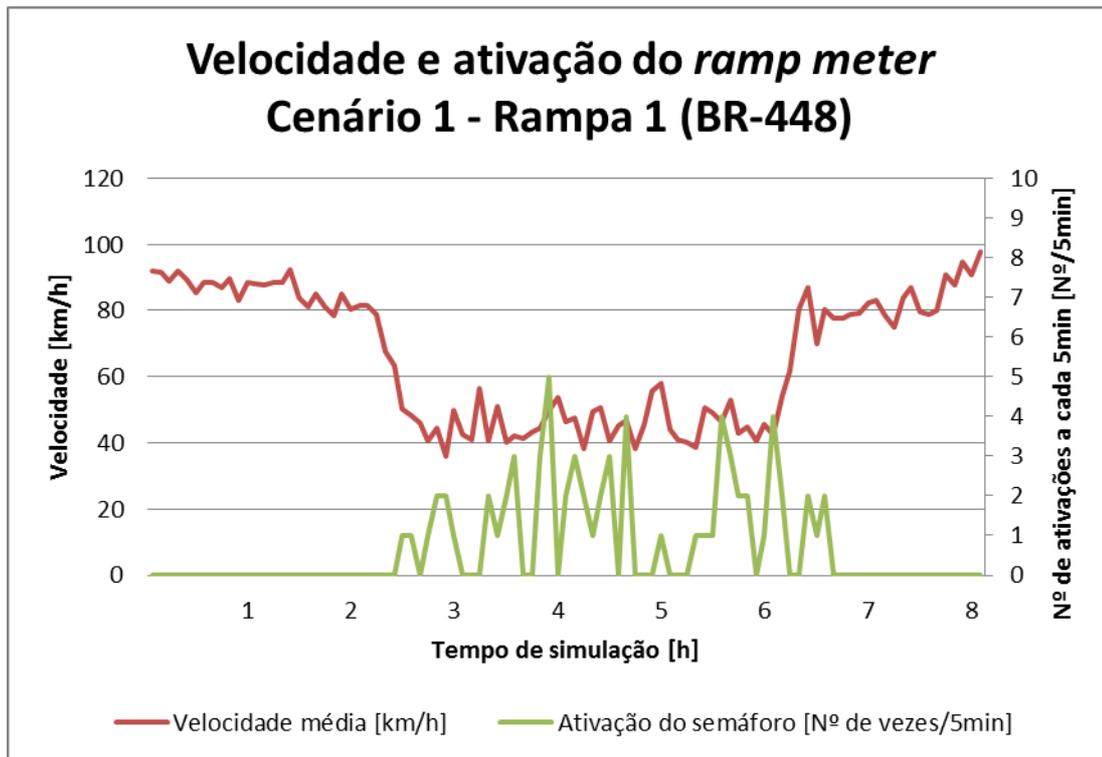
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 29 - Fluxo e velocidade com *ramp metering* na rampa 1

(fonte: elaborado pelo autor)

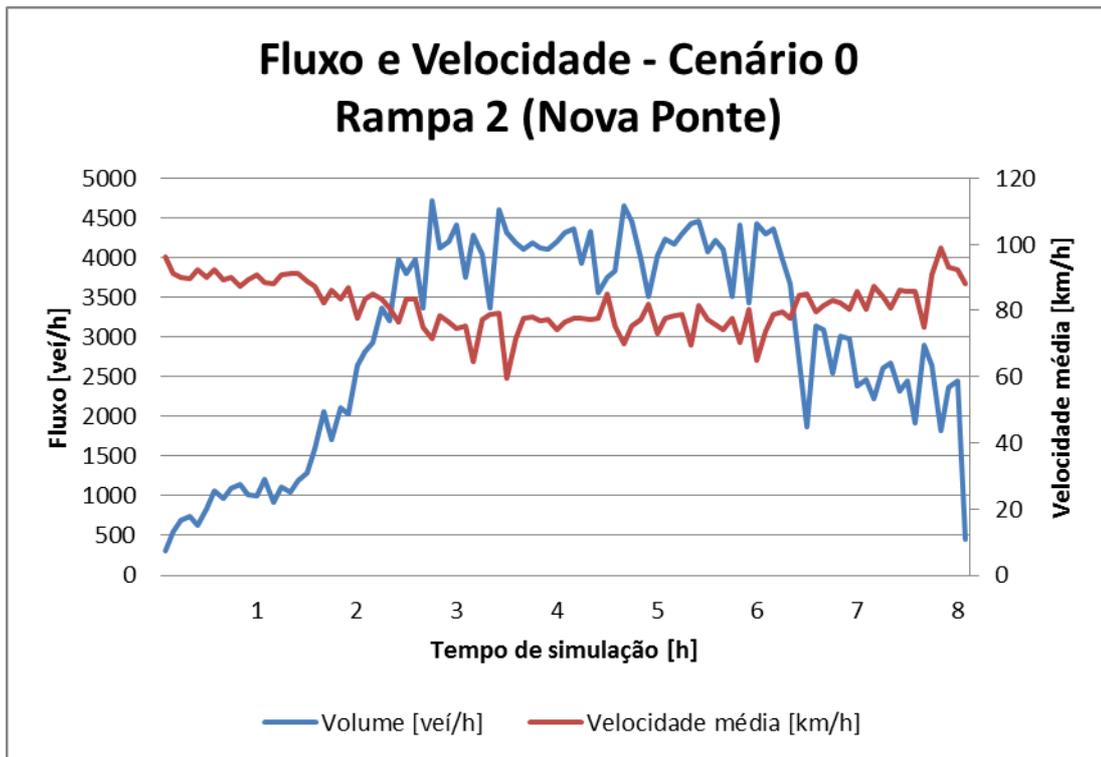
Figura 30 - Fluxo e velocidade com *ramp metering* na rampa 1

(fonte: elaborado pelo autor)

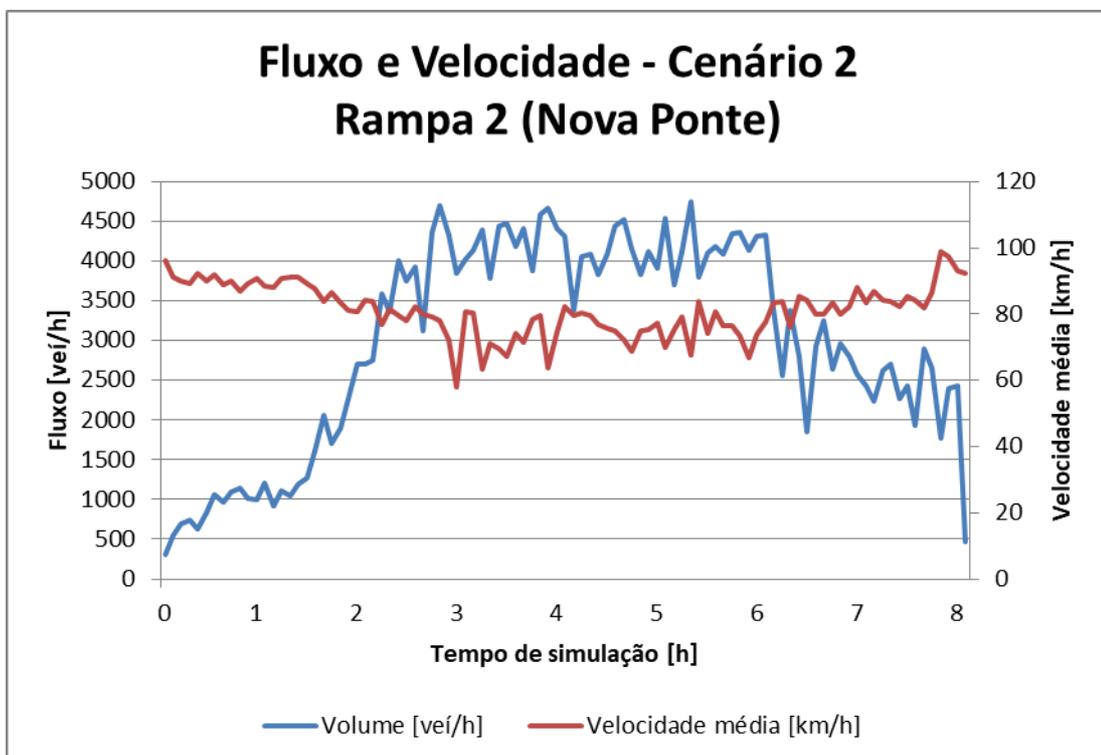
Figura 31 - Gráfico de velocidade e período de ativação do *ramp meter*

(fonte: elaborado pelo autor)

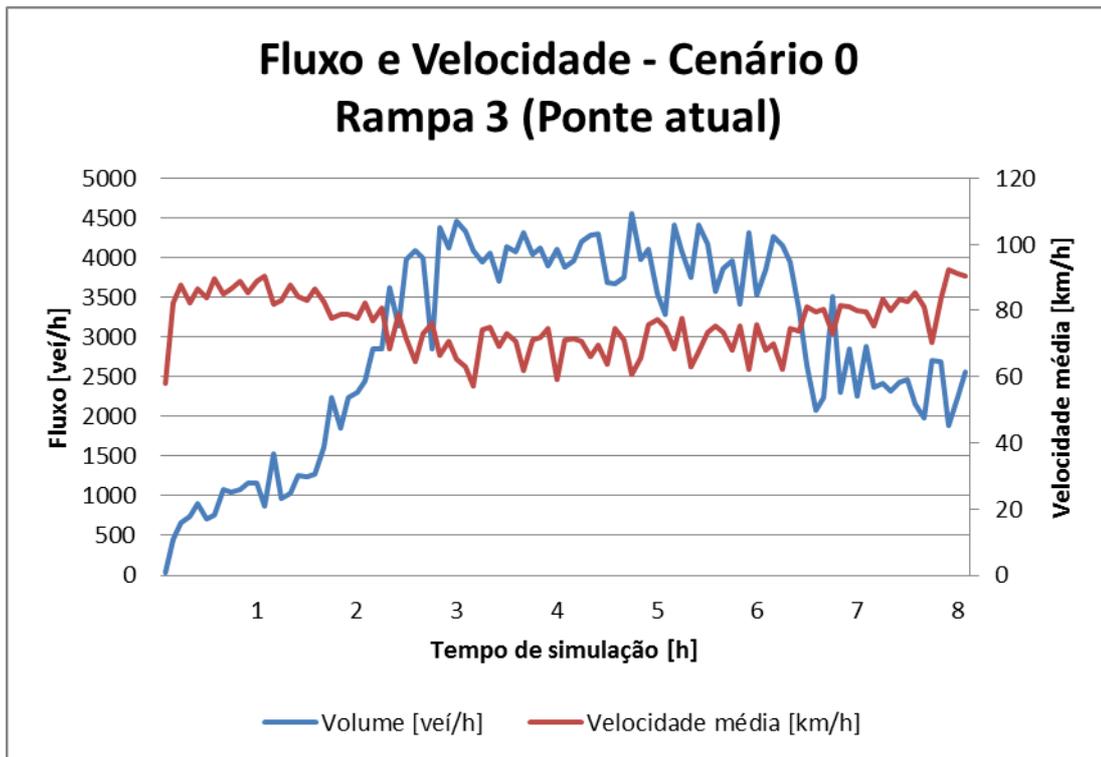
Para os gráficos das rampas 2 e 3 abaixo, com e sem *ramp meter*, destaca-se a falta da queda de velocidade quando do aumento do fluxo de veículos à jusante das interseções. Há somente uma leve queda na velocidade média quando o fluxo atinge seu pico, mas que permanece em patamares de não congestionamento para as duas rampas. Esse fato corrobora com a noção de que estes pontos não são críticos para o trecho, no sentido de que não geram *breakdown*. Aqui cabe a ponderação de que, por haver um ponto crítico nas proximidades da rampa 1, que situa-se à montante das rampas 2 e 3, o fluxo nestas duas rampas já está sofrendo uma ponderação.

Figura 32 - Fluxo e velocidade sem *ramp metering*

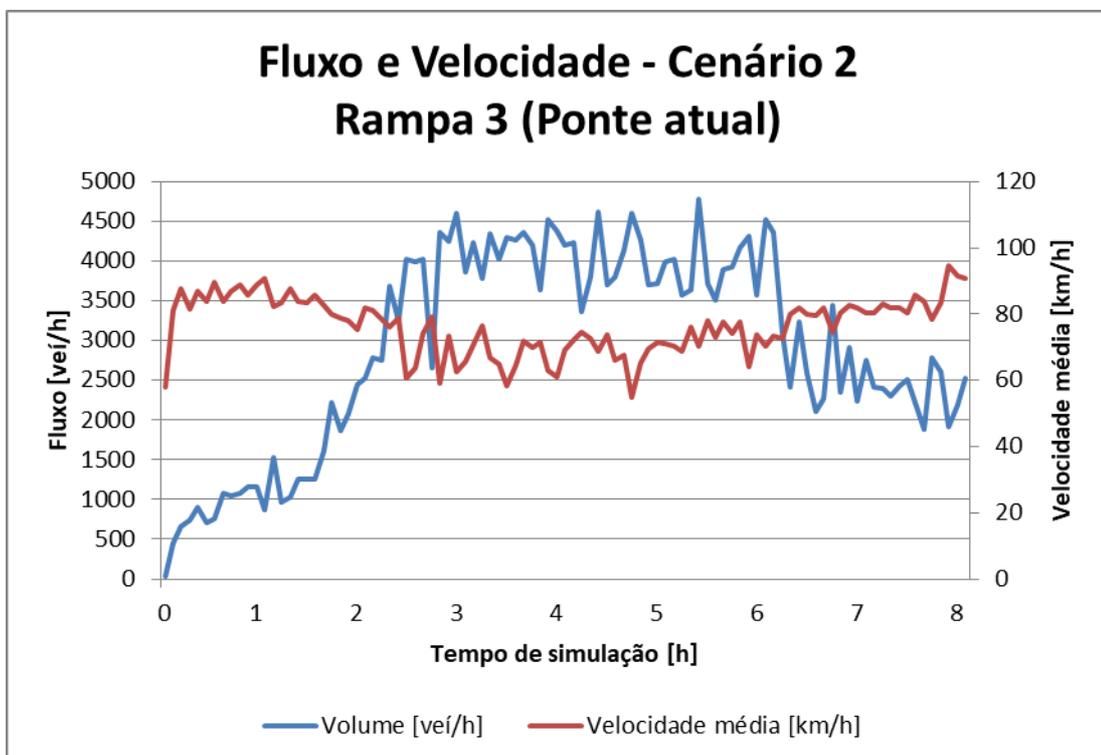
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 33 - Fluxo e velocidade com *ramp metering*

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 34 - Fluxo e velocidade sem *ramp metering*

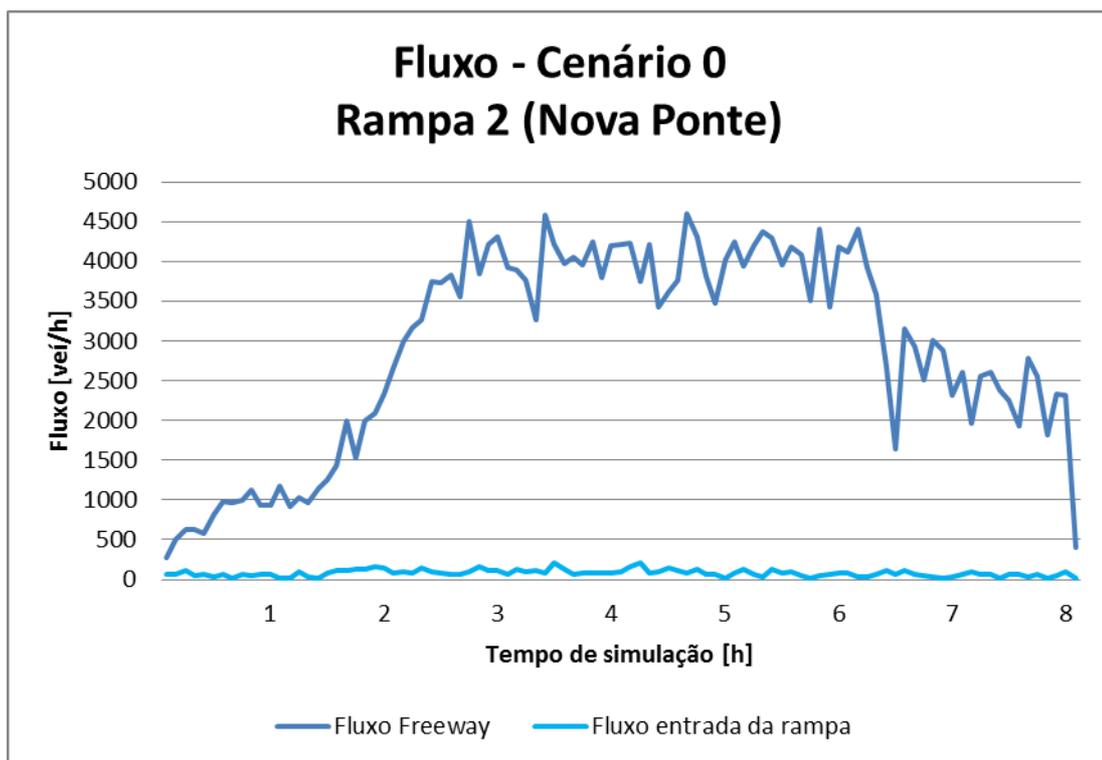
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 35 - Fluxo e velocidade com *ramp metering*

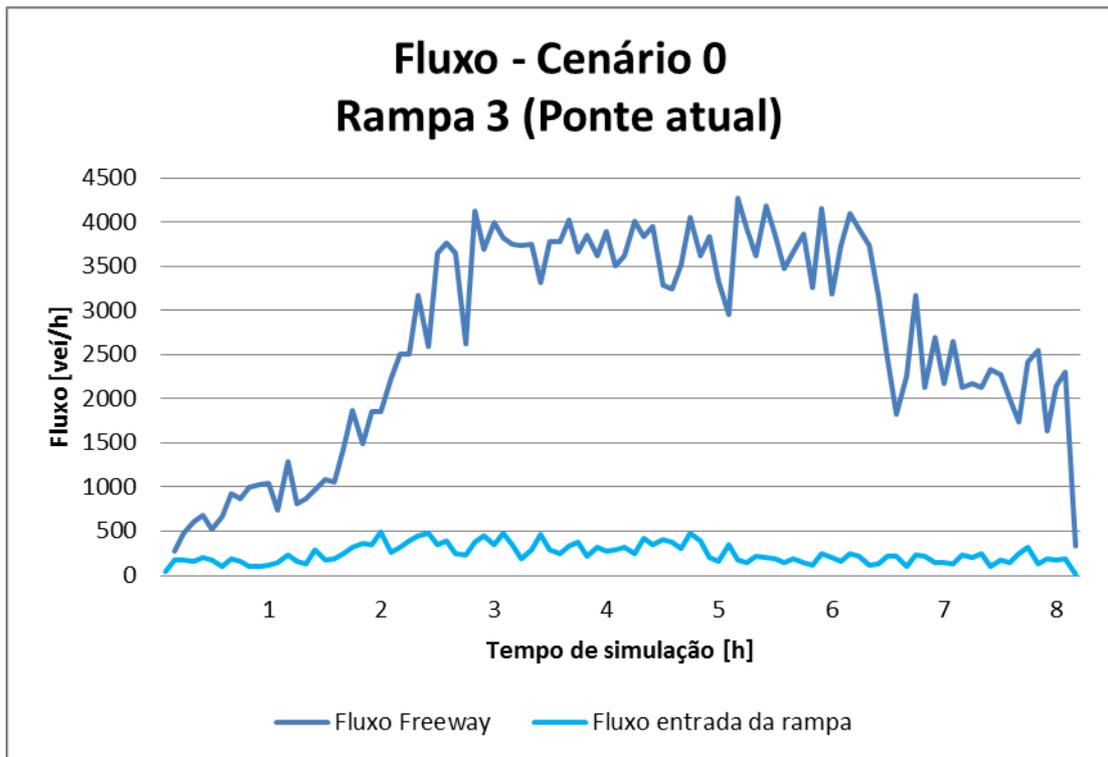
(fonte: elaborado pelo autor)

Os gráficos logo abaixo representam os fluxos detectados na entrada de cada rampa, 2 e 3, e os fluxos da BR-290 detectados logo à montante das interseções. Para a rampa 2, atinge-se valores máximos de 204 veí/h na entrada da rampa enquanto que para a rampa 3 este valor foi de 492 veí/h. Ambos valores são muito baixos quando comparados ao fluxo da *freeway*, sendo o fluxo de entrada da rampa 2 inclusive abaixo do mínimo recomendado para implantação de *ramp meter* pelo Highways Agency no capítulo 5.3.2, de 300 veí/h. Quando analisamos que estes pontos não são críticos para o trecho analisado e adicionamos a discrepância entre fluxos de entrada da rampa e *freeway*, evidencia-se o baixo impacto de controlar esses veículos oriundos das rampas 2 e 3 quanto a velocidades médias, atrasos e capacidade da via. Entretanto, salienta-se o fato de que, sem esta ponte nova sobre o rio Guaíba, haveria um fluxo muito mais intenso na rampa atual (3), pois esta representaria o único acesso a Porto Alegre para quem cruza Eldorado do Sul.

Figura 36 - Fluxo de entrada da rampa e *freeway*



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 37 - Fluxo de entrada da rampa e *freeway*

(fonte: elaborado pelo autor)

7 DISCUSSÃO

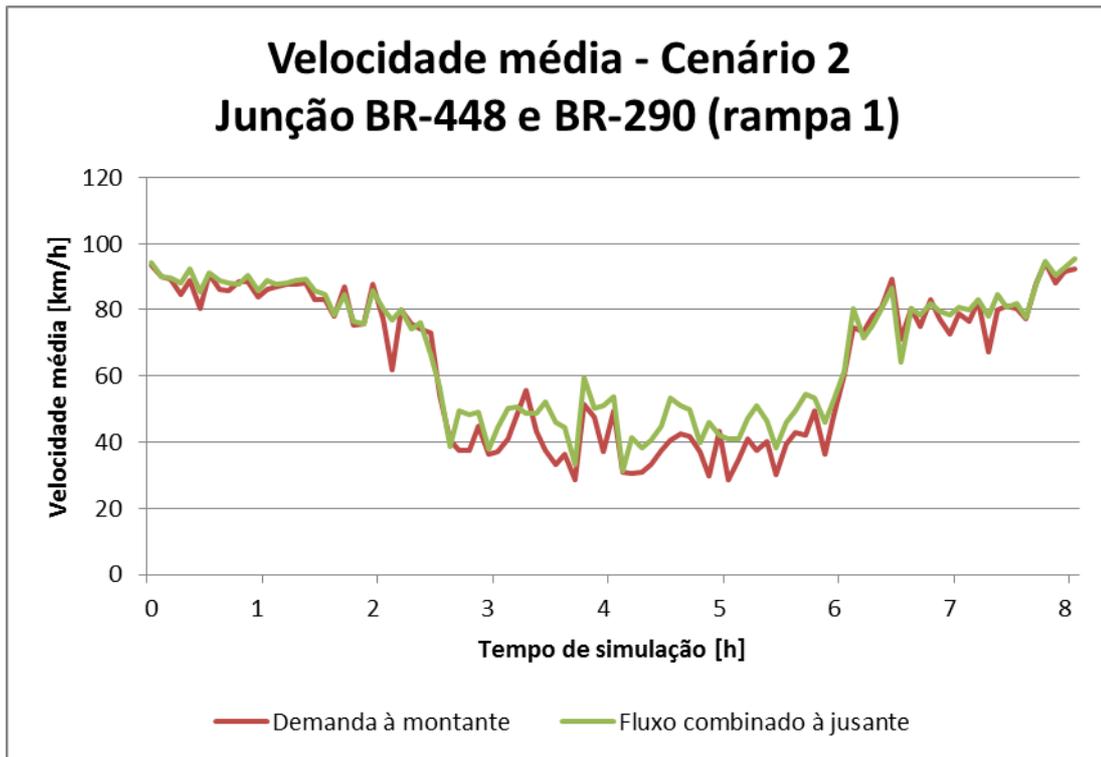
É importante analisar os resultados obtidos e entender o comportamento da via. O controle no acesso à rampa para uma via de grande tráfego se mostra interessante porque geralmente caracteriza um ponto crítico no fluxo de veículos, por ser uma operação de interseção de duas demandas. Devido a isso se tem buscado cada vez mais entender a melhor maneira de realizar essa inserção de um novo fluxo na via principal, evitando o fenômeno de *breakdown* e posterior queda nas velocidades médias dos veículos com consequente diminuição na qualidade percebida pelos condutores. Quando, entretanto, existe um ponto crítico à montante das interseções na própria via principal, o fluxo desta já chega à interseção limitado, o que penaliza enormemente os benefícios de controlar a rampa de acesso.

Na rampa 1 de acesso da BR-448 à BR-290, observa-se um grande fluxo de veículos oriundos da via principal, dividido em três faixas, que se junta ao fluxo oriundo do interior do estado. Conforme observado no local, uma nova faixa na pista é criada para os veículos ingressantes. Essa nova faixa somada à faixa adicional que é criada logo antes da interseção resulta em 5 faixas para a operação dos fluxos agora de BR-448 e BR-290. Em suma, a operação da *freeway*, responsável pelo maior fluxo, dispunha de 3 faixas anteriormente à interseção, enquanto que posteriormente o fluxo conjunto passa a contar com 5. Com esses detalhes geométricos da pista somados aos gráficos de fluxo e velocidade e probabilidade de *breakdown*, surge o questionamento referente ao verdadeiro ponto crítico de congestionamento da BR-290.

Quando analisamos os gráficos inseridos abaixo de velocidades médias à montante e jusante das interseções, percebe-se distinção entre o gráfico da rampa 1 das demais rampas, na medida que para a rampa 1 a velocidade dos veículos à montante da interseção é menor que à jusante. Somente faz sentido encontrar velocidades médias menores à montante se esses veículos estiverem saindo de um congestionamento e/ou o ponto de interseção não caracterizar um afunilamento, ou novo ponto crítico. Entretanto, qualquer combinação dessas configurações, conforme exposto nos parágrafos anteriores, limita os benefícios potenciais de qualquer controle na rampa de acesso. A hipótese sugerida pelo autor é de que os veículos estão encontrando um ponto crítico e limitação na curva anterior à interseção das duas rodovias na rampa 1. Também pelo número de faixas aumentar substancialmente posteriormente à interseção BR448 e BR-290, os condutores então estariam iniciando o

processo de aceleração para entrar na velocidade de fluxo livre. Como não há demanda necessária para causar *breakdown* nas rampas 2 e 3, não é possível caracterizar queda repentina na velocidade para a operação de interseção. Entretanto, observa-se que, mesmo assim, as velocidades médias sempre são menores após a interseção.

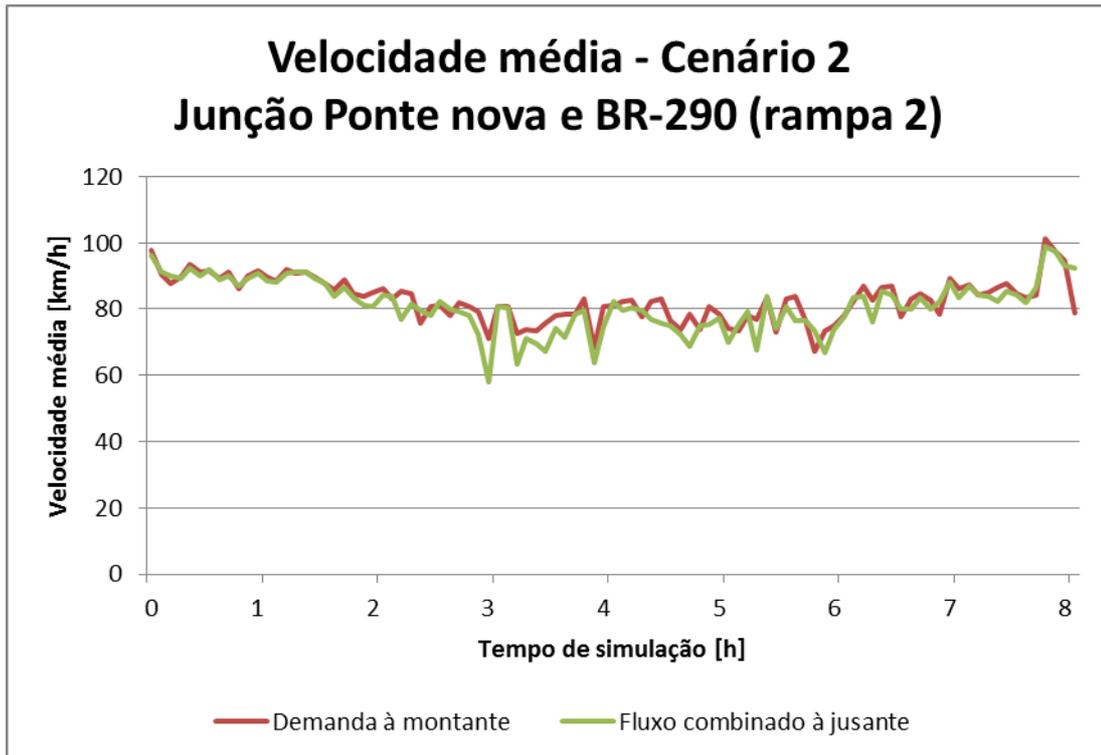
Figura 38 - Velocidade antes e depois da interseção, com *ramp metering*



(fonte: elaborado pelo autor)

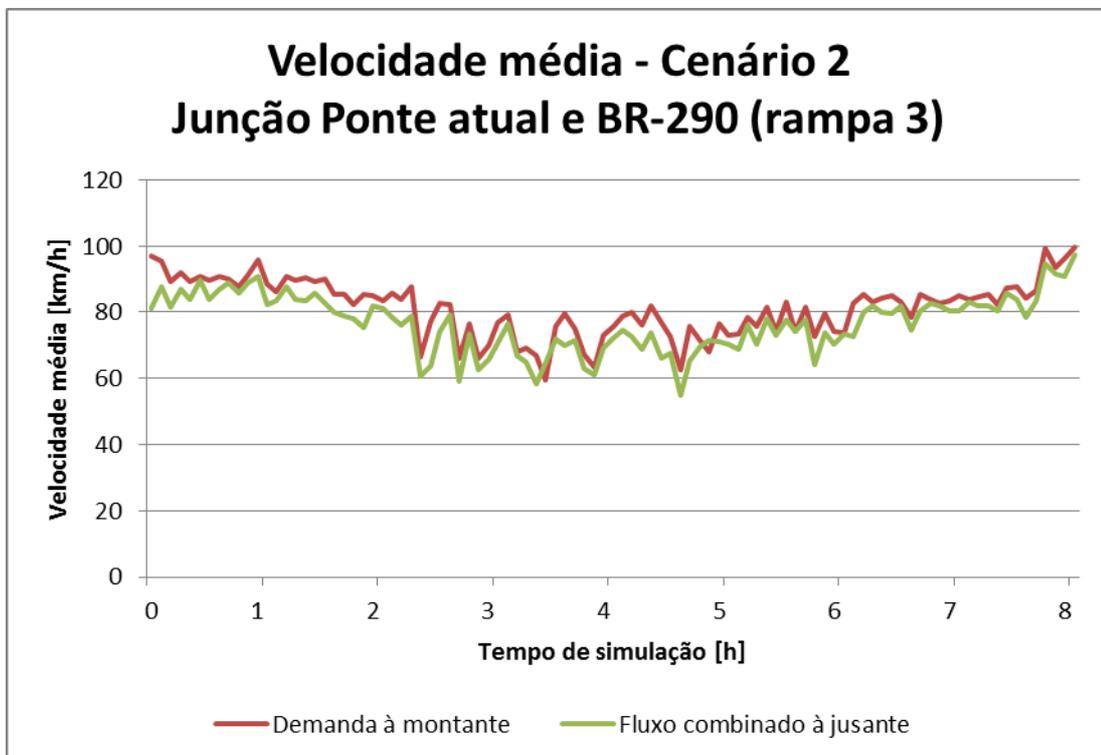
Para o segundo cenário temos as rampas 2 e 3 do trabalho, onde não se encontrou sequer o efeito *breakdown*, nem a parte inferior das nuvens de fluxo e velocidade. Esses dados demonstram que esses pontos não são críticos, premissa que pode ser explicada pelos baixos volumes oriundos das rampas de acesso em comparação ao da BR-290. Com isso, conclui-se que a construção da nova ponte sobre o rio Guaíba tem potencial de diluir enormemente o fluxo de veículos oriundo de Eldorado do Sul, o que minimiza o potencial de *breakdown* nos acessos a Porto Alegre, visto que evita conflitos.

Figura 39 - Velocidades antes e depois da interseção, com *ramp metering*



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 40 - Velocidades antes e depois da inteseção, com *ramp metering*



(fonte: elaborado pelo autor)

8 CONCLUSÃO

O propósito de instaurar e investir em ferramentas de gerenciamento ativo de tráfego é de melhorar a experiência das pessoas quando elas se locomovem. A melhora da experiência, entretanto, pode ser evidenciada e buscada de maneiras diversas e este é um fator importante na determinação quanto da implantação de qualquer novo meio de controle ou infraestrutura viária. No caso do *ramp meter*, foco deste trabalho, em acordo com experiência internacional, busca-se maior fluidez para os condutores que trafegam em uma via principal em detrimento das rampas de acesso à via. Os parâmetros analisados geralmente englobam tempo de viagem, atrasos e velocidades médias no trecho, parâmetros também analisados neste trabalho.

Para os cenários sem *ramp meter* e com *ramp meter* somente na rampa de acesso 1 (BR-448), os tempos de viagem e atrasos não apresentaram diferenças significativas, mantendo-se abaixo da casa dos 2%. Já comparando os atrasos entre o cenário sem *ramp meter* e *ramp meter* em todos os acessos, foram encontradas diferenças de aproximadamente 3,7%. Este resultado, porém, foi destrinchado entre período em que o *ramp meter* estava ativado e desligado e os valores respectivos de 3,71% e 3,66% foram evidenciados, o que caracteriza um comportamento geral de menores atrasos, não necessariamente um resultado a ser atribuído ao *ramp meter*.

Para os gráficos de fluxo e velocidade no tempo, observou-se similaridade entre todos os cenários, com e sem *ramp meter*. A maior diferença analisada foi de queda brusca de velocidade média na rampa 1, de aproximadamente 85 km/h para 45 km/h, enquanto que para as rampas 2 e 3 a velocidade média foi amenizada mas permaneceu em patamares altos (de 85 km/h para 70 km/h). Para entendimento do impacto do controle na rampa 1, em que houve queda brusca de velocidade média, foram analisados os momentos de atuação do semáforo na rampa de acesso e para isso é necessário compreender o algoritmo utilizado. Para o algoritmo de Demanda e Capacidade utilizado no modelo, aplicou-se como parâmetro fixo a capacidade da via obtida através do gráfico de nuvem de fluxo e velocidade. Este valor foi identificado como sendo 5500 veí/h, a capacidade que a via suporta, e para taxa máxima de veículos a serem liberados na rampa utilizou-se 900 veí/h. Conseqüentemente, o algoritmo iniciou seu funcionamento quando da detecção de fluxo maior ou igual a 4600 veí/h na *freeway*, enquanto que o *breakdown* observado através da queda de velocidades aconteceu com fluxos de 4500

veí/h. O *ramp meter* atuou, então, em um fluxo já em estado congestionado e com baixas velocidades médias.

Para as rampas 2 e 3 foram identificados baixos fluxos de veículos oriundos dos acessos, sendo seus máximos respectivos 204 veí/h e 492 veí/h. No caso da rampa 2, o valor é inclusive menor que o mínimo recomendado para implantação do *ramp meter*, de 300 veí/h. Essa discrepância entre volumes da *freeway* e rampas é resultado da diluição do tráfego oriundo de Eldorado do Sul pela construção da nova ponte sobre rio Guaíba e possivelmente representa o baixo impacto do *ramp meter* para os parâmetros analisados nessas rampas de acesso.

A capacidade da via foi estudada também através do método de probabilidade de *breakdown*. Entretanto, não foram identificados eventos suficientes para caracterizar probabilidades ótimas, 15 a 20% de acordo com Elefteriadou et al. (2011), e por isso os valores de capacidade obtidos não foram incorporados no algoritmo do *ramp meter*.

A essa incapacidade de obter-se *breakdown* suficientes na rampa de acesso 1, soma-se o fato de não terem sido observados pontos de altos fluxos e altas velocidades no gráfico de nuvem de velocidade e fluxo e ainda aspectos geométricos ao redor da interseção, e criou-se a premissa de ponto crítico anterior à interseção de rampa 1 com *freeway*. As velocidades médias da *freeway* à montante da interseção e jusante foram evidenciadas e, de fato, eram maiores à montante, o que pode representar que a interseção não é um ponto crítico e sim um ponto de escoamento de fluxo já congestionado.

Os resultados apresentados neste trabalho corroboram para uma limitação do algoritmo de Demanda e Capacidade quando da utilização de capacidade como um parâmetro fixo e não probabilístico. Entretanto, as configurações geométricas da via anteriores à interseção entre rampa 1 (BR-448) e *freeway* indicam que há possivelmente um ponto crítico congestionando o tráfego à montante da interseção, o que limita os benefícios potenciais da ferramenta. Recomenda-se, portanto, análise futura do comportamento da rodovia anteriormente às rampas de acesso, para determinação do ponto crítico do trecho. Para as rampas 2 e 3, não se recomenda o descarte da implantação de *ramp meter* sem prévia análise quanto dos benefícios relativos ao incremento da segurança, parâmetros muito importantes e inclusive mais visados em muitos locais de aplicação.

9 REFERÊNCIAS

AASHTO. A Policy on Geometric Design of Highways and Streets. 2001.

BERTINI, R. L. Ramp Metering Algorithms and Implementations : A Worldwide Overview. 2016.

BURLEY, M.; GAFFNEY, J. Managed Freeways. **Published by VicRoads. Network and Asset Planning**, n. july, 2013.

CALEFFI, F. Gerenciamento ativo de tráfego: estudo de caso de uma autoestrada brasileira. 2013.

CALEFFI, F.; CYBIS, B. Proposição e análise de um sistema de gerenciamento ativo de tráfego em um estudo de caso de uma autoestrada brasileira. v. 24, n. 1, p. 74–83, 2016.

CALTRANS. Caltrans Highway Design Manual. v. 855, n. 1, p. 1–54, 2014.

CALTRANS. Ramp Metering Design Manual. n. April, p. 1–7, 2016.

CHAUDHARY, N. A. et al. Ramp Metering Algorithms and Approaches for Texas. v. 7, n. 2, 2004.

CHIEN, S. I. J. Evaluating ramp metering control systems using microsimulation for US interstate highway I-80. **Tamkang Journal of Science and Engineering**, v. 4, n. 4, p. 277–292, 2001.

CNT. Transporte Rodoviário: Desempenho do setor, infraestrutura e investimentos. 2017.

CONTRAN. Sinalização Vertical de Advertência. **Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito**, p. 218, 2007.

CONTRAN. Sinalização Semafórica. 2014.

EASYWAY. Traffic Management Services RAMP METERING. p. 1–59, 2012.

ELEFTERIADOU, L. et al. Proactive ramp management under the threat of freeway-flow breakdown. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, v. 16, p. 4–14, 2011.

- HIGHWAYS AGENCY. Ramp metering - summary report. **Highways Agency, UK**, 2007.
- JACOBSON, L. et al. Ramp Management and Control Handbook. n. January, 2006.
- KAPPLER, L. Análise dos benefícios da implantação da segunda ponte do guaíba. 2017.
- KURZHANSKIY, A. A.; VARAIYA, P. Traffic management: An outlook. **Economics of Transportation**, v. 4, n. 3, p. 135–146, 2015.
- LU, C.; ELEFTERIADOU, L. An investigation of freeway capacity before and during incidents. **Transportation Letters**, v. 5, n. 3, p. 144–153, 2013.
- MIRSHAHI, M. et al. Active Traffic Management: The Next Step in Congestion Management. **Distribution**, n. July, p. 84, 2007.
- MIZUTA, A. et al. Ramp Metering: A Proven, Cost-Effective Operation Strategy - A primer. **Fhwa-Hop-14-020**, 2014.
- PERSAUD, B.; YAGAR, S.; BROWNLEE, R. Exploration of the Breakdown Phenomenon in Freeway Traffic. n. 98, p. 64–69, 1998.
- PIOTROWICZ, G.; ROBINSON, J. Ramp Metering Status in North America. **Update**, n. June, 1995.
- PÚGLIA, G. A. Análise de implantação de faixa de alta ocupação através de software de simulação. 2016.
- SEUNGMIN, K.; GILLEN, D. Assessing the Benefits and Costs of Intelligent Transportation Systems : Ramp Meters. n. July, 1999.
- TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. Highway Capacity Manual. 2010.
- ZECHIN, D. Aplicabilidade de Ramp Metering na BR-290 Utilizando o algoritmo ALINEA. 2016.
- ZHANG, L.; LEVINSON, D. Ramp metering and freeway bottleneck capacity. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, 2010.