

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**  
**ESCOLA DE ENGENHARIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

Felipe Caleffi

**GERENCIAMENTO ATIVO DE TRÁFEGO: ESTUDO DE CASO DE  
UMA AUTOESTRADA BRASILEIRA**

Porto Alegre

2013

Felipe Caleffi

Gerenciamento Ativo de Tráfego: Estudo de Caso de Uma Autoestrada Brasileira

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção, modalidade Acadêmica, na área de concentração em Sistemas de Transportes.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Helena Beatriz Betella Cybis, PhD.

Porto Alegre

2013

Felipe Caleffi

**Gerenciamento Ativo de Tráfego: Estudo de Caso de Uma Autoestrada Brasileira**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção na modalidade Acadêmica e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

---

**Prof. Helena Beatriz Bettella Cybis, PhD.**

Orientador PPGEP/UFRGS

---

**Prof. Carla Schwengber ten Caten**

Coordenador PPGEP/UFRGS

**Banca Examinadora:**

Professor João Fortini Albano, Dr. (PPGEP/UFRGS)

Professor Luis Antônio Lindau, *Ph.D.* (DEMAC/PUCRS)

Marcelo Leismann de Oliveira, Dr. (SUINF/ANTT)

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a minha orientadora no desenvolvimento desta dissertação, a Prof.<sup>a</sup> Helena Beatriz Betella Cybis, que desempenhou um papel fundamental para o êxito da pesquisa.

Agradeço aos pesquisadores Arthur Schmidt, Gabriela Ferret e Yann Moisan pela colaboração nas pesquisas desenvolvidas durante o desenvolvimento desta dissertação.

Agradeço ao CNPq pela bolsa de auxílio à pesquisa.

Agradeço a minha noiva Gisele e a minha família pelo apoio incondicional em todos os momentos da minha formação acadêmica e profissional.

## RESUMO

Esta dissertação apresenta uma análise da modelagem de estratégias de gerenciamento ativo de tráfego para um estudo de caso de uma autoestrada brasileira. O gerenciamento ativo de tráfego busca de uma forma eficiente melhorar as condições do tráfego durante horários e locais mais congestionados. Esta abordagem consiste em uma combinação de estratégias que aperfeiçoam a operação da infraestrutura existente. Esta dissertação é composta de três artigos, nos quais são apresentados: (i) as tendências atuais de gerenciamento ativo de tráfego, discutindo seus propósitos, definições, benefícios e tendências em novos projetos, (ii) uma análise dos dados coletados no trecho em estudo, que servem de base para a calibração e validação do modelo de simulação, (iii) calibração no software VISSIM do segmento de autoestrada estudado para reproduzir os comportamentos observados em campo, incluindo as velocidades, parâmetros de *car following* e de troca de faixas e (iv) uma avaliação e quantificação da eficácia da modelagem das estratégias de gerenciamento ativo de tráfego para o trecho em estudo. A calibração do modelo foi um estágio importante da modelagem, pois o trecho modelado possui características especiais quanto ao comportamento do tráfego. Assim, o simular não é capaz de reproduzir naturalmente o trecho em estudo com seus parâmetros *default*, fazendo-se necessário um esforço de calibração para representar de forma satisfatória as características presentes na rodovia. O tempo de *headway* e a distância mínima entre os veículos, a agressividade nas trocas de faixa, e nas acelerações e desacelerações foram os parâmetros com maior influência na modelagem. Dados coletados através de filmagens e de coletores com laços indutivos foram usados para calibrar e validar o modelo de simulação. As estratégias de gerenciamento ativo de tráfego empregadas na simulação foram a de harmonização da velocidade e a do uso temporário do acostamento. A modelagem demonstrou que o gerenciamento ativo de tráfego tem impactos positivos na operação do tráfego. Redução de *headways*, redução nos tempos médios de viagem, na variabilidade dos tempos de viagem e no número de trocas de faixa foram benefícios mensurados. Com o uso das estratégias houve também redução do tempo em que o fluxo da via permanece em colapso, aumentando a eficiência do trecho.

Palavras-chave: Gerenciamento ativo de tráfego, Harmonização da velocidade, uso temporário do acostamento.

## ABSTRACT

This paper presents an analysis of modeling strategies for active traffic management to a case study of a Brazilian highway. The active traffic management search for an efficient way to improve traffic conditions during the most congested times and locations. This approach consists of a combination of strategies that improve the operation of existing infrastructure. This dissertation consists of three articles in which they are presented: (i) the current trends of active traffic management, discussing its purpose, definitions, benefits and trends in new projects, (ii) an analysis of data collected in the stretch under study, serving as a basis for calibration and validation of the simulation model, (iii) calibration of the VISSIM software for a studied freeway segment to reproduce the behaviors observed in the field, including speeds, car following parameters and lane changes and (iv) an assessment and quantification of the effectiveness of modeling strategies for active traffic management to the stretch under study. The calibration of the model was an important stage of the modeling, because the modeled stretch has special characteristics as the traffic behavior. Thus, the simulator is not able to naturally simulate the performance under study with its default parameters, making it necessary a calibration effort to represent satisfactorily the features present on the highway. The headway time and the minimum distance between vehicles, aggressiveness in lane changes, and the acceleration and deceleration parameters were most influential in the model. Data collected through filming and collectors with inductive loops were used to calibrate and validate the simulation model. The active traffic management strategies assets employed in the simulation were the speed harmonization and temporary hard shoulder use. The modeling showed that the active traffic management has a positive impact on traffic operation. Reducing headways, reduction in average travel time, variability in travel times and the number of lane changes were measured benefits. With the use of strategies were also reduces the time in which the flow pathway remains collapsed, increasing the efficiency of the stretch.

Keywords: Active traffic management, speed harmonization, temporary hard shoulder use.

## LISTA DE FIGURAS

### Artigo 1

Figura 1: Uso temporário do acostamento com harmonização da velocidade, Alemanha (Sparmann, 2007).....	19
Figura 2: Gerenciamento ativo de tráfego na rodovia M42 (Grant, 2007).....	21
Figura 3: Algoritmo de controle de harmonização da velocidade.....	24

### Artigo 2

Figura 1: Segmento de rodovia modelado.....	31
Figura 2: Relação fluxo x velocidade para observações do período de 18 de Setembro a 05 de Novembro, coletadas no km 17.....	33
Figura 3: Porcentagem dos valores <i>fitness</i> .....	40
Figura 4: Comparação entre os dados coletados através de laços indutivos e dados do modelo de simulação calibrado, para os km 17 e 19.....	40

### Artigo 3

Figura 1: Relação fluxo x velocidade para observações do mês de Janeiro de 2013.....	46
Figura 2: Trecho em estudo.....	48
Figura 3: Gargalo ativo.....	48
Figura 4: Fluxograma do algoritmo de controle.....	50
Figura 5: Relação fluxo x velocidade da rodovia.....	50
Figura 6: Comparação das velocidades médias e volume das simulações A e B, para o pórtico 5.....	51
Figura 7: Comparação das velocidades médias e volume das simulações A e C, para o pórtico 5.....	52
Figura 8: Comparação das velocidades para os pórticos 2, 4 e 7.....	53
Figura 9: Comparação dos tempos de viagem.....	54
Figura 10: Comparação das trocas de faixa.....	56

## LISTA DE TABELAS

### Artigo 1

Tabela 1: Estratégias do gerenciamento ativo de tráfego e seus potenciais benefícios.....	20
Tabela 2: Limites de Velocidade nos países com harmonização da velocidade.....	21
Tabela 3: Condições de infraestrutura das rodovias com gerenciamento ativo de tráfego.....	26

### Artigo 2

Tabela 1: Velocidades de fluxo livre dos veículos.....	32
Tabela 2: Porcentagens dos fluxos e velocidades médias na praça de pedágio, para baixas intensidades de fluxo.....	34
Tabela 3: Parâmetros a serem calibrados e suas faixas de valores aceitáveis.....	36
Tabela 4: Parâmetro de troca de faixas modificado.....	37
Tabela 5: Parâmetros de <i>car following</i> que foram modificados.....	38
Tabela 6: Velocidades médias e valores <i>fitness</i> .....	39

### Artigo 3

Tabela 1: Comparações do tempo de viagem para a rodovia operando na capacidade.....	55
---	----

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	11
1.1 OBJETIVOS .....	12
1.2 JUSTIFICATIVA .....	13
1.3 DELIMITAÇÕES DO ESTUDO .....	13
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO .....	14
2. ARTIGO 1 .....	15
1. INTRODUÇÃO .....	16
2. GERENCIAMENTO ATIVO DE TRÁFEGO .....	17
2.1 Estratégias do Gerenciamento Ativo de Tráfego .....	17
2.1.1 Ramp Metering .....	18
2.1.2 Harmonização da Velocidade .....	18
2.1.3 Uso Temporário do Acostamento.....	19
2.2 Desafios .....	20
2.3 Benefícios.....	20
3 ANÁLISE E DISCUSSÃO DE CASOS IMPLANTADOS.....	21
3.1 Inglaterra .....	21
3.2 Alemanha .....	22
3.3 Holanda .....	22
3.4 Grécia e Dinamarca.....	22
3.5 Estados Unidos.....	23
4 ALGORITMOS DE HARMONIZAÇÃO DA VELOCIDADE E USO TEMPORÁRIO DO ACOSTAMENTO .....	24
5 CONDIÇÕES DE INFRAESTRUTURA DAS RODOVIAS COM GERENCIAMENTO ATIVO DE TRÁFEGO .....	25
6 CONCLUSÕES .....	26
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	27
3. ARTIGO 2 .....	29

1. INTRODUÇÃO .....	30
2. ESTUDO DE CASO .....	31
2.1 Levantamento de Dados .....	32
3. PARÂMETROS DE CALIBRAÇÃO NO VISSIM .....	34
4 CALIBRAÇÃO DO ESTUDO DE CASO .....	35
4.1 Análise de Sensibilidade dos Parâmetros de Calibração.....	36
4.2 Análise Combinatória dos Parâmetros Calibrados.....	36
4.2.1 Troca de Faixas.....	37
4.2.2 Car Following .....	37
4.3 Validação dos Dados .....	38
4.4 Comentários Gerais Sobre o Processo de Calibração .....	38
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	41
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	42
4. ARTIGO 3 .....	43
1. INTRODUÇÃO .....	44
2. CARACTERIZAÇÃO DO TRECHO EM ESTUDO .....	46
2.1 Condições Operacionais do Trecho em Estudo.....	46
3. MODELAGEM DO TRECHO EM ESTUDO .....	47
3.1 Layout do Trecho em Estudo .....	47
3.2 Algoritmo de Controle do Gerenciamento Ativo de Tráfego .....	48
4. ANÁLISE DOS RESULTADOS DE SIMULAÇÃO .....	51
4.1 Impacto nas Velocidades Médias .....	51
4.2 Impacto nos Tempos de Viagem.....	53
4.3 Impacto nas Trocas de Faixa.....	55
5. CONCLUSÕES .....	56
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	57
5. CONCLUSÕES .....	59
5.1 PRINCIPAIS CONCLUSÕES .....	59
5.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	61
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	62

## 1. INTRODUÇÃO

O crescente aumento populacional, da frota de veículos e do número de viagens motorizadas resulta em um aumento da demanda por transportes em todo mundo. Este crescimento na demanda de transportes é observado em praticamente todos os países do mundo, e intensifica a necessidade de promover ações que possam reduzir os congestionamentos e impactos negativos do tráfego.

Os recursos para ampliar infraestrutura viária muitas vezes são limitados, e insuficientes para acompanhar o aumento do tráfego. Combater os congestionamentos através de técnicas de gerenciamento de tráfego apoiadas em sistemas inteligentes é uma forte tendência de países com melhores condições tecnológicas. Amparados por coleta de dados, processamento de informações e sistemas de decisão em tempo real, estes sistemas inteligentes – chamados de gerenciamento ativo de tráfego, envolvem um conjunto de técnicas e estratégias que gerenciam dinamicamente congestionamentos recorrentes e não recorrentes com base nas condições de tráfego existentes (Federal Highway Administration, 2007).

O gerenciamento ativo de tráfego busca de uma forma eficiente melhorar as condições do tráfego durante horários e locais mais congestionados. Esta abordagem consiste em uma combinação de estratégias operacionais que, implantadas em conjunto, aperfeiçoa a operação da infraestrutura existente, oferecendo benefícios mensuráveis à rede de transporte (Federal Highway Administration, 2007).

As principais estratégias do gerenciamento ativo de tráfego incluem a harmonização da velocidade e o uso temporário do acostamento. Harmonização da velocidade envolve a redução dos limites de velocidade da via em áreas de congestionamento para manter um melhor fluxo de tráfego e reduzir o risco de colisões. O uso temporário do acostamento tem o objetivo de fornecer uma faixa adicional de rolamento para oferecer uma maior capacidade durante um congestionamento ou em períodos que as vias estão sobrecarregadas (Sisiopiku et. al., 2009). O uso temporário do acostamento é geralmente implantado em conjunto com harmonização da velocidade. Usa-se harmonização da velocidade para reduzir as velocidades praticadas antes da liberação do uso do acostamento (Kuhn, 2008).

No Brasil, o uso de estratégias de gerenciamento ativo de tráfego não é empregado. Particularidades no comportamento do tráfego nas autoestradas brasileiras fazem do país um bom candidato a receber estas estratégias inovadoras. O comportamento não é homogêneo, e cada faixa de tráfego possui médias de velocidades, intensidades de fluxo e composições de tráfego diferentes. Portanto, o gerenciamento ativo de tráfego pode oferecer benefícios ao harmonizar as velocidades entre as faixas e assim retardar o aparecimento de colapso no fluxo, reduzir o número de ultrapassagens e o risco de colisões. Com o uso temporário do acostamento é possível oferecer uma capacidade adicional em períodos congestionados.

Os simuladores de tráfego são capazes de reproduzir diversos cenários reais de tráfego, e são amplamente usados na elaboração de estudos e desenvolvimento de projetos em engenharia de transportes. Os modelos de simulação são especialmente úteis quando as estratégias em análise exigem novas construções ou investimentos onerosos, como é o caso dos sistemas de gerenciamento ativo de tráfego (Park e Qi, 2006). O software de micro simulação VISSIM (PTV, 2010), foi utilizado nesta dissertação para simular as estratégias de gerenciamento ativo de tráfego, em um estudo de caso de uma autoestrada brasileira, a fim de avaliar e quantificar a eficácia destas estratégias.

## **1.1 OBJETIVOS**

O objetivo principal desta dissertação é a análise da modelagem de estratégias de gerenciamento ativo de tráfego para um estudo de caso de uma autoestrada brasileira.

Os objetivos específicos desta dissertação são:

- a) Descrever as tendências atuais de gerenciamento ativo de tráfego, discutindo seus propósitos, definições, benefícios e tendências em novos projetos;
- b) Analisar os dados coletados no trecho em estudo, que servem de base para a calibração e validação do modelo de simulação;
- c) Calibrar no software VISSIM um segmento de autoestrada para reproduzir os comportamentos observados em campo, incluindo as velocidades, parâmetros de *car following* e de troca de faixas;

- d) Avaliar e quantificar a eficácia da modelagem das estratégias de gerenciamento ativo de tráfego para o trecho em estudo.

## **1.2 JUSTIFICATIVA**

O aumento da frota e do número de viagens motorizadas são fenômenos observados em praticamente todos os países do mundo, e causam impactos negativos no tráfego. Países com melhores condições tecnológicas estão utilizando as estratégias de gerenciamento ativo de tráfego para mitigar estes impactos negativos.

As rodovias brasileiras não possuem implantação de estratégias de gerenciamento ativo de tráfego. Como o comportamento do tráfego destas rodovias não é homogêneo, com cada faixa de tráfego possuindo médias de velocidades, intensidades de fluxo e composições de tráfego diferentes, o gerenciamento ativo de tráfego pode oferecer benefícios e combater os impactos negativos no tráfego.

As soluções de gerenciamento de tráfego são frequentemente avaliadas através de simulações. Ao modelar uma rodovia é possível fazer testes e analisar os impactos de estratégias sem demandar novas construções ou investimentos onerosos. Desta forma, o presente estudo se justifica, na medida em que aprofunda a discussão sobre as estratégias de gerenciamento ativo de tráfego, e analisa os impactos de simulação destas estratégias num estudo de caso de uma autoestrada brasileira.

## **1.3 DELIMITAÇÕES DO ESTUDO**

A caracterização do gerenciamento ativo de tráfego é baseada na análise da literatura revisada, e a caracterização do comportamento do tráfego no trecho modelado é baseada na coleta de dados feita na autoestrada em estudo. O simulador de tráfego VISSIM 5.30 foi escolhido para modelagem das estratégias de gerenciamento ativo de tráfego. A literatura revisada inclui artigos científicos, anais de congressos, relatórios técnicos e manuais de usuário do software utilizado.

## **1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO**

Esta dissertação contém cinco capítulos. O primeiro capítulo apresenta uma introdução ao gerenciamento ativo de tráfego, destacando os objetivos, delimitações e estrutura desta dissertação. O estudo desenvolvido nesta dissertação é apresentado em forma de artigos científicos, que correspondem aos capítulos 2, 3 e 4.

O capítulo 2 corresponde ao artigo “Tendências atuais do gerenciamento ativo de tráfego”. Este artigo descreve as tendências atuais do gerenciamento ativo de tráfego, discutindo seus propósitos, definições, benefícios e tendências em novos projetos.

O capítulo 3 corresponde ao artigo “Calibração de um segmento especial de autoestrada através do software VISSIM”. Neste artigo é apresentado o esforço de calibração e análise de um segmento de uma autoestrada brasileira.

O capítulo 4 corresponde ao artigo “Análise e implementação de um sistema de gerenciamento ativo de tráfego em um estudo de caso de uma autoestrada brasileira”. Este artigo apresenta a modelagem de estratégias de gerenciamento ativo de tráfego para uma autoestrada brasileira, a fim de avaliar e quantificar a eficácia destas estratégias.

O quinto capítulo apresenta conclusões desta dissertação e recomendações para trabalhos futuros. Por fim, são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas na dissertação e nos artigos que a compõe.

## **2. ARTIGO 1**

### TENDÊNCIAS ATUAIS DO GERENCIAMENTO ATIVO DE TRÁFEGO

# TENDÊNCIAS ATUAIS DO GERENCIAMENTO ATIVO DE TRÁFEGO

**Felipe Caleffi**

**Helena Beatriz Bettella Cybis**

Laboratório de Sistema de Transportes – LASTRAN  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS

## RESUMO

Este texto apresenta uma revisão do estado da arte e da prática em gerenciamento ativo de tráfego. Usando uma série de técnicas e estratégias de gestão, o gerenciamento ativo de tráfego busca de uma forma eficiente melhorar as condições do tráfego durante os horários mais congestionados ou nos locais mais congestionados. Com foco na confiabilidade da viagem, ele maximiza a eficácia e eficiência das instalações e aumenta o rendimento e a segurança. Este artigo caracteriza as estratégias deste gerenciamento ativo de tráfego, apresentando as condições de infraestrutura das rodovias, bem como os desafios e benefícios para sua implantação. Através de uma análise de casos implantados, são discutidas as estratégias utilizadas pelos diversos países, além de seus objetivos e impactos de implantação.

## ABSTRACT

This paper presents a review of the state of the art and practice in active traffic management. Using a series of techniques and management strategies, active traffic management search efficiently improve traffic conditions during peak hours or congested places. With a focus on the reliability of the trip, it maximizes the effectiveness and efficiency of facilities and increases the performance and security. The paper characterizes the strategies of active traffic management, showing the conditions of the roads infrastructure as well as the challenges and benefits for its implementation. Through an analysis of implanted cases, the strategies used by various countries are discussed, as well as its goals and impact of implementation.

## 1. INTRODUÇÃO

O aumento da frota e do número de viagens motorizadas tem intensificado a necessidade de promover ações mais efetivas para reduzir impactos negativos do tráfego. Os recursos para ampliar a infraestrutura viária são limitados, e insuficientes para acompanhar o aumento do tráfego.

Este fenômeno é observado em praticamente todos os países do mundo. Os países com melhores condições tecnológicas apresentam uma forte tendência de investimento em técnicas de gerenciamento de tráfego apoiadas em sistema inteligentes, subsidiados por coleta de dados, processamento de informações, sistemas de decisão e informação a usuários.

O gerenciamento ativo de tráfego é capaz de melhorar as condições do tráfego durante os horários mais congestionados ou nos locais mais congestionados, usando uma série de técnicas de gestão em tempo real, incluindo *ramp metering*, harmonização da velocidade, e o uso temporário do acostamento como faixa auxiliar, para melhorar o rendimento e a capacidade (Federal Highway Administration, 2011b).

Este artigo tem como objetivo descrever as tendências atuais do gerenciamento ativo de tráfego, discutindo seus propósitos, definições, benefícios e tendências em novos projetos. O

artigo está estruturado em seções que apresentam: uma revisão bibliográfica, trazendo as estratégias usadas no gerenciamento ativo de tráfego, bem como seus desafios e benefícios; uma descrição dos critérios usados nas estratégias de implantação da harmonização da velocidade e do uso temporário do acostamento em alguns países europeus e nos Estados Unidos; e discussão das condições de infraestrutura das rodovias com gerenciamento ativo de tráfego.

## **2. GERENCIAMENTO ATIVO DE TRÁFEGO**

O gerenciamento ativo de tráfego envolve um conjunto de técnicas que tem por objetivo gerenciar dinamicamente congestionamentos recorrentes e não recorrentes com base nas condições de tráfego existentes. Esta abordagem consiste em uma combinação de estratégias operacionais que, quando implantadas em conjunto, ajudam a aperfeiçoar a operação da infraestrutura existente e oferecem benefícios mensuráveis para a rede de transporte (Federal Highway Administration, 2007).

Os objetivos principais do gerenciamento ativo de tráfego são: reduzir o congestionamento; reduzir a variabilidade das velocidades; reduzir o stress dos usuários; aumentar a capacidade; tornar o tempo de viagem mais confiável; melhorar a segurança, reduzindo o número e a gravidade dos acidentes; tornar o tempo de resposta mais rápido em acidentes e; possibilitar uma informação cada vez maior para os usuários (Grant, 2007).

### **2.1 Estratégias do Gerenciamento Ativo de Tráfego**

As principais estratégias do gerenciamento ativo de tráfego são:

- *Ramp metering*;
- Harmonização da velocidade;
- Uso temporário do acostamento.

Na prática, estas estratégias são implantadas através de um conjunto de medidas de apoio, como o gerenciamento de faixas e painéis de mensagens variáveis.

O gerenciamento de faixas é usado para aumentar a eficiência das autoestradas por meio de diversas ações operacionais e de design, e para fornecer um melhor fluxo nas viagens em horas pico (Texas Department of Transportation, 2002). Estas ações incluem o gerenciamento de faixas com alta ocupação de veículos, uso exclusivo de faixas para ônibus e caminhões, e restrições de uso de faixa. O gerenciamento de faixas é uma estratégia frequentemente utilizada em autoestradas americanas com o objetivo de melhorar a mobilidade e minimizar o impacto sobre o meio ambiente (Federal Highway Administration, 2005).

Através de pórticos instalados ao longo da rodovia, é possível manter o motorista atualizado sobre as condições do tráfego. Estes pórticos possuem painéis de mensagens variáveis para orientar os usuários sobre a velocidade permitida na via, alertar sobre a ocorrência de acidentes, trazer informações sobre o tráfego, e quais faixas estão disponíveis para uso. No caso do uso temporário do acostamento, é possível informar ao usuário com antecedência quando este estará disponível (Federal Highway Administration, 2007).

### 2.1.1 Ramp Metering

*Ramp metering* é uma estratégia de controle de intersecções baseada na utilização de semáforos em rampas de acesso, que define a taxa de veículos entrante na autoestrada, permitindo que veículos tenham acesso à autoestrada em intervalos predeterminados. Sistemas de *ramp metering* ajudam a reduzir o congestionamento e a melhorar a segurança dos motoristas (Stewart, 2003).

O objetivo do sistema é evitar ou retardar o aparecimento de colapso no fluxo da via principal e diminuir o número de acidentes que ocorrem durante a fusão do tráfego, melhorando o rendimento. Com isso é possível promover uma fusão gradual do fluxo das rampas de acesso com o fluxo proveniente da autoestrada. Impedindo ou retardando o colapso no fluxo da via, tem-se um melhor rendimento durante os horários de pico, tempos de viagem mais confiáveis, redução do risco de acidentes e melhorias ambientais como a redução de ruído e de consumo de combustível (Kaveshgar et al., 2011) (Highways Agency, 2007).

### 2.1.2 Harmonização da Velocidade

Os sistemas de harmonização da velocidade usam limites de velocidade variável sobre cada faixa da autoestrada para regular as velocidades continuamente, com base nas condições de tráfego existentes. Os limites de velocidade podem ser reduzidos quando as condições da autoestrada são inadequadas para trafegar em altas velocidades, tais como durante mau tempo, quando há incidente ou congestionamento em segmentos específicos, a fim de reduzir a probabilidade de acidentes e facilitar uma maior fluidez do tráfego (Sisiopiku et al., 2009). A harmonização da velocidade pode também levar à redução dos *headways* entre veículos, contribuindo para aumentar a capacidade da via (Chang et al., 2011).

Um sistema de harmonização da velocidade consiste tipicamente de: um conjunto de sensores de tráfego para coletar dados sobre fluxos e velocidades da via, necessários para determinar as condições de tráfego; painéis de mensagem variável e; uma unidade central de processamento para executar ações de controle. Painéis de mensagem variável são usados para informar os condutores das condições de tráfego e para mostrar os limites de velocidade impostos (Lin et al., 2004).

Limites de velocidade variável devem ser implantados de tal forma que os motoristas possam ter o tempo adequado para ajustar a sua velocidade. Segundo estudo de Lee e Abdel-Aty (2008), realizado através de um simulador de condução, verificou-se que os motoristas não seguem os limites de velocidade variável e os painéis de mensagem variável quando estes recebem orientações com mudanças abruptas no limite de velocidade. No entanto, quando o limite de velocidade é alterado gradualmente, os motoristas são propensos a seguir as orientações dos painéis de mensagem e os limites de velocidade.

Um impacto positivo da harmonização da velocidade sobre a segurança do tráfego é a redução da probabilidade de acidentes. Avaliações dos impactos da implantação da harmonização da velocidade na segurança do tráfego indicam uma redução no número de acidentes de 20 a 30%. A harmonização da velocidade também é apontada como um meio para reduzir as emissões dos veículos e o ruído (Carlson et al., 2010).

### 2.1.3 Uso Temporário do Acostamento

O uso temporário do acostamento tem por objetivo fornecer faixas adicionais de rolamento na plataforma de pavimentação existente, permitindo aos veículos o uso dos acostamentos da esquerda ou da direita em condições específicas. A operacionalização é controlada por meio de sinais, dinamicamente variáveis, que informam aos motoristas que a faixa do acostamento está liberada para o tráfego em um determinado segmento. O uso temporário do acostamento contribui para aumentar o desempenho das autoestradas, fornecendo capacidade adicional durante um congestionamento ou em horários de pico em que as vias estão sobrecarregadas (Sisiopiku et al., 2009).

O uso temporário do acostamento é geralmente implantado em conjunto com harmonização da velocidade. Usa-se harmonização da velocidade para reduzir as velocidades praticadas antes da liberação do uso do acostamento (Kuhn, 2008). A velocidade deve ser reduzida para manter condições compatíveis com volumes elevados. Portanto, reduzir a variabilidade das velocidades é um componente essencial para a confiabilidade e manutenção do fluxo de tráfego (Ungemah e Kuhn, 2009). A figura 1 apresenta um exemplo do uso temporário do acostamento com harmonização da velocidade na Alemanha.



**Figura 1:** Uso temporário do acostamento com harmonização da velocidade, Alemanha (Sparmann, 2007)

A utilização do acostamento como uma faixa de tráfego segura, deve atender a alguns requisitos geométricos. Segundo Sisiopiku et al. (2009), o acostamento deve: ser contínuo; possuir sempre a mesma largura total; não possuir superelevação; satisfazer os requisitos de projeto similar para as outras faixas de tráfego e; ser projetado para suportar tráfego de carga e veículos pesados.

## 2.2 Desafios

A implantação do gerenciamento ativo de tráfego envolve alguns desafios. Segundo Federal Highway Administration (2007) esses desafios incluem: usar de estratégias inovadoras de gerenciamento para lidar com o congestionamento; assumir compromisso em oferecer maior segurança aos usuários; promover a mudança de cultura e a aceitação dos usuários com relação ao gerenciamento ativo do tráfego e; atingir o melhor custo-benefício no uso das novas estratégias.

A redução do número e severidade de acidentes, aumento da confiabilidade no tempo de viagem, a manutenção de sistemas de informação aos usuários sobre as condições da autoestrada, podem aumentar significativamente a confiabilidade e aceitação dos usuários em relação aos sistemas de gerenciamento ativos de tráfego (Federal Highway Administration, 2007).

## 2.3 Benefícios

Segundo Federal Highway Administration (2011b), os potenciais benefícios do gerenciamento ativo de tráfego incluem: aumento da capacidade da via; diminuição de incidentes primários e secundários; velocidades mais uniformes, que resultam na diminuição de *headways*; comportamento dos condutores mais uniforme; maior confiabilidade no tempo de viagem; redução dos ruídos e emissões gerados pelo tráfego e; capacidade de retardar o aparecimento das condições de colapso (fluxo de *break down*).

A tabela 1, adaptada de Federal Highway Administration (2007), descreve os benefícios potenciais das estratégias de gerenciamento ativo de tráfego, assim como os benefícios das ferramentas usadas na implantação destas estratégias. Embora essas estratégias sejam descritas individualmente, é a aplicação combinada destas estratégias que proporcionam um maior benefício.

**Tabela 1:** Estratégias do gerenciamento ativo de tráfego e seus potenciais benefícios

Estratégias do gerenciamento ativo de tráfego	Potenciais benefícios								
	Aumento da capacidade	Decréscimo de incidentes	Velocidades mais uniformes	Decréscimo nos <i>headways</i>	Comportamento mais uniforme do condutor	Aumento da confiabilidade da viagem	Redução do ruído do tráfego	Redução de emissões	Redução no consumo de combustível
Harmonização da velocidade		*	*	*	*	*	*	*	*
Uso temporário do acostamento	*					*			
<i>Ramp Metering</i>		*	*		*	*	*	*	*
Gerenciamento de faixas	*	*		*	*	*			
Painéis de mensagens variáveis		*			*	*			

A combinação destas estratégias leva a um aperfeiçoamento das condições operacionais da infraestrutura existente e fornecem benefícios mensuráveis para a rede de transporte e aos usuários.

### 3 ANÁLISE E DISCUSSÃO DE CASOS IMPLANTADOS

Alguns países da Europa, assim como os Estados Unidos, têm implantando medidas de gerenciamento ativo de tráfego em suas autoestradas. O precursor do gerenciamento ativo de tráfego foi a Inglaterra, e logo, estas medidas foram implantadas também na Alemanha, Holanda, Grécia, Suécia, Dinamarca, e posteriormente nos Estados Unidos. Em uma análise dos benefícios da implantação do gerenciamento ativo de tráfego na Europa, Federal Highway Administration (2007) aponta uma redução nas colisões de 10 a 30%; redução de 30 a 50% nas colisões secundárias; diminuição do tempo dos incidentes – detecção mais rápida e com melhor acessibilidade aos incidentes; redução de 10 a 30% do tempo de viagem; redução de 3 a 10% nos atrasos de viagem e; aumento da taxa de fluxo em zonas congestionadas.

#### 3.1 Inglaterra

O gerenciamento ativo de tráfego começou a ser implantado na Inglaterra no ano de 2002, na rodovia M42, entre as intersecções 3a e 7, no sudeste de Birmingham, com o objetivo de aumentar a segurança e a capacidade, diminuir os congestionamentos e melhorar a confiabilidade das viagens (Grant, 2007). Todas as estratégias conhecidas de gerenciamento ativo de tráfego são usadas na Inglaterra, e as que recebem maior atenção são o uso temporário do acostamento, *ramp metering* e harmonização da velocidade (Federal Highway Administration, 2007).

Além da rodovia M42, as rodovias M25, M4, M5 e M6 também já possuem implantações das estratégias de gerenciamento ativo de tráfego. A figura 2 apresenta um exemplo típico de gerenciamento ativo de tráfego na rodovia M42.



**Figura 2:** Gerenciamento ativo de tráfego na rodovia M42 (Grant, 2007)

Os impactos da implantação das medidas de gerenciamento ativo de tráfego são positivos. A variabilidade do tempo de viagem durante os dias da semana caiu cerca de 22%; a média de acidentes com danos pessoais caiu de 5,1 para 1,8 por mês; 68% dos usuários reportaram que se sentem melhores informados sobre as condições de tráfego e; a velocidade média do tráfego aumentou 8km/h (Federal Highway Administration, 2011a).

### **3.2 Alemanha**

Na Alemanha, o gerenciamento ativo de tráfego começou a ser implantado na rodovia A5, com o objetivo de aumentar a capacidade e melhorar a segurança de suas autoestradas. *Ramp metering*, painéis de mensagens variáveis, uso temporário do acostamento e harmonização da velocidade são as principais estratégias usadas, além de uma estratégia de restrição para caminhões (Federal Highway Administration, 2007). Os painéis de mensagens variáveis são usados principalmente para informar os usuários sobre as condições do congestionamento e fornecer estimativas do tempo de viagem (Sparmann, 2007).

As rodovias A3, A4, A7 e A99 também possuem estratégias de gerenciamento ativo de tráfego. Avaliação realizada por Geistefeldt (2011) nas autoestradas da Alemanha mostra que o uso da harmonização da velocidade leva a uma menor variação na capacidade da via e um menor risco de colapso no fluxo. A capacidade de uma autoestrada com três faixas aumentou de 20 a 25% com o uso temporário do acostamento (Geistefeldt, 2012).

### **3.3 Holanda**

Na Holanda, o gerenciamento ativo de tráfego foi implantado com o objetivo principal de garantir a circulação segura e ininterrupta do tráfego. Eliminar gargalos, melhorar o fluxo e melhorar a comunicação com os usuários, garantindo assim viagens confortáveis, foram outros objetivos da implantação do gerenciamento ativo de tráfego (Federal Highway Administration, 2007).

As rodovias A2, A4, A12, A13, A15, A16, A17, A20, A27 e A29 possuem estratégias de gerenciamento ativo de tráfego. Painéis de mensagens variáveis, harmonização da velocidade, uso temporário do acostamento e *ramp metering* são as estratégias mais usadas, além da estratégia de restrição para caminhões, usada também na Alemanha. Sistemas de *ramp metering* geraram redução nas ondas de choque e aumento da velocidade nas autoestradas. Usuários apontam uma melhor reação para as informações recebidas através dos painéis de mensagem variáveis (Middelham, 2006).

### **3.4 Grécia e Dinamarca**

Na Grécia, assim como na Dinamarca, o gerenciamento ativo de tráfego foi implantado com o objetivo de reduzir o congestionamento. A harmonização da velocidade, gerenciamento de faixas, além de cobranças de pedágio para desestimular as viagens de curta distância são as estratégias usadas na Grécia. O gerenciamento de faixas é usado para separar os ônibus do

restante do tráfego, criando uma faixa somente para estes ônibus (Federal Highway Administration, 2007).

### 3.5 Estados Unidos

Nos Estados Unidos, a implantação do gerenciamento ativo de tráfego teve como objetivo a redução do congestionamento, para maximizar a eficiência dos veículos durante todos os períodos do dia. Várias agências estaduais de transportes dos Estados Unidos estão usando estratégias de gerenciamento ativo de tráfego para minorar o congestionamento de suas autoestradas. Os estados da Virginia, Texas, Michigan, Colorado, Washington, Washington D.C., Califórnia, Missouri e Minnesota são os precursores no uso do gerenciamento ativo de tráfego nos Estados Unidos (Sisiopiku et al., 2009).

A grande maioria das estratégias de gerenciamento ativo de tráfego conhecidas são usadas nas autoestradas dos Estados Unidos, porém cada estado aplica diferentes estratégias. Uma estratégia frequentemente usada é a faixa de alta ocupação, onde uma faixa da autoestrada é dedicada exclusivamente para veículos com alta ocupação de passageiros. Em alguns casos, os usuários tem a opção de pagar para usar a faixa de alta ocupação (Washington State Department of Transportation, 2007).

Destacam-se os impactos registrados no estado de Washington. Com a harmonização da velocidade houve redução de 16% nas colisões e 30% nos ferimentos em colisões; com painéis de mensagens variáveis e *ramp metering* houve redução de 15% nas colisões; além da redução do congestionamento e aumento da capacidade (Jacobsen e Farradyne, 2008).

A Tabela 2 apresenta uma síntese dos limites de velocidade empregados nos países onde há a harmonização da velocidade.

**Tabela 2:** Limites de Velocidade nos países com harmonização da velocidade

	Velocidade Limite da Via	Limites de Velocidade com a Harmonização da Velocidade		
		1ª Redução de Velocidade	2ª Redução de Velocidade	Demais Reduções de Velocidade
<b>Inglaterra</b>	70 mp/h (112 km/h)	60 mp/h (96 km/h)	50 mp/h (80 km/h)	40 mp/h (64 km/h)
<b>Alemanha</b>	120 km/h (75 mph)	100 km/h (62 mp/h)	80 km/h (50 mp/h)	60 km/h (37 mp/h)
<b>Holanda</b>	120 km/h (75 mph)	90 km/h (56 mp/h)	70 km/h (43 mp/h)	50 km/h (31 mp/h)
<b>Grécia</b>	120 km/h (75 mph)	110 km/h (68 mp/h)	100 km/h (62 mp/h)	(90, 80, 70) km/h (56, 50, 43) mp/h
<b>Estados Unidos</b>	70 mp/h (112 km/h)	60 mp/h (96 km/h)	50mp/h (80 km/h)	40 mp/h (64 km/h)
	65 mp/h (105 km/h)	55 mp/h (88 km/h)	45 mp/h (72 km/h)	35 mp/h (56 km/h)

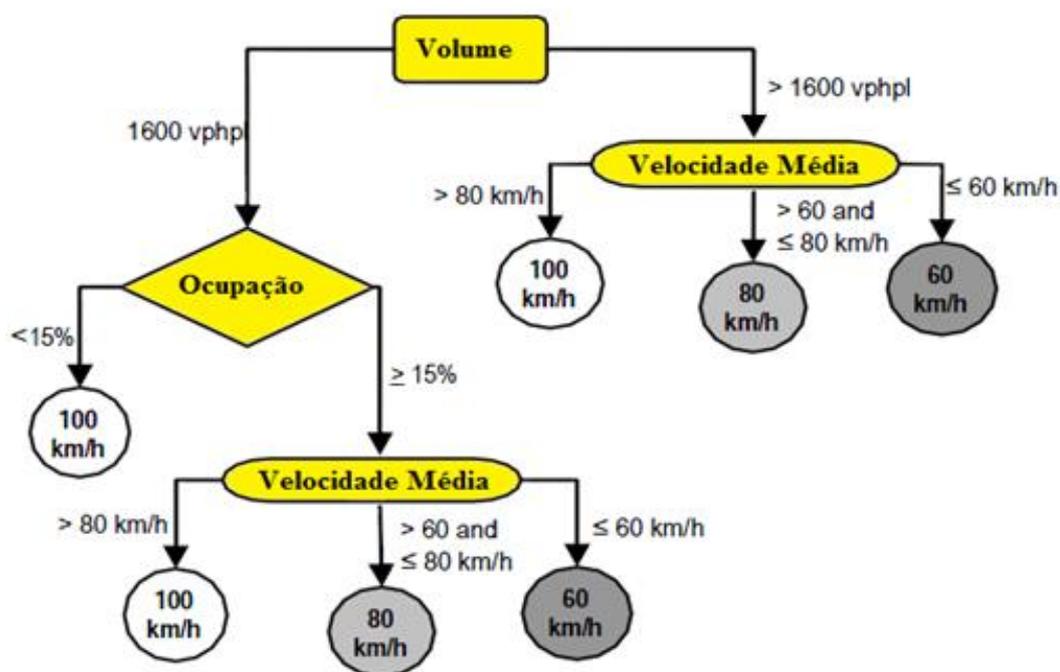
\* S.I. - Sem Informação.

( ) Velocidades Arredondadas.

#### 4 ALGORITMOS DE HARMONIZAÇÃO DA VELOCIDADE E USO TEMPORÁRIO DO ACOSTAMENTO

As estratégias de controle usadas para determinar os limites de velocidade na operação da harmonização da velocidade são fundamentais para o sucesso do funcionamento do sistema. Estas estratégias são aplicadas através de um algoritmo que determina indicadores e limites que acionam a harmonização da velocidade. Através das informações provenientes de detectores é possível fazer o controle destas estratégias em tempo real, otimizando o processo (Nezamuddin et al., 2011).

A literatura apresenta algoritmos que utilizam desde simples estratégias de fácil implantação, até algoritmos avançados com inúmeras regras. A Figura 3 apresenta um pequeno, mas representativo algoritmo que ilustra o uso das estratégias de controle frequentemente usadas na Europa e na América do Norte. Este algoritmo de controle, é usado por Allaby et al. (2007) para um estudo de caso de uma autoestrada próxima à cidade de Toronto, no Canadá. Este algoritmo usa limites de velocidade com decrementos de 20 km/h. Alguns países como a Inglaterra e a Holanda usam algoritmos semelhantes a este no controle de suas estratégias.



**Figura 3:** Algoritmo de controle de harmonização da velocidade

Neste algoritmo, o limite de velocidade da via é de 100 km/h. Quando o algoritmo de controle detecta, através de dados realimentados em tempo real pelos detectores, um volume maior do que 1600 veículos por hora por faixa, ele passa a monitorar a velocidade média dos veículos e caso estas velocidades estejam menor do que 80 km/h, a harmonização da velocidade passa a ser empregada. Da mesma forma, se o volume for menor que 1600 veículos por hora por faixa, porém a ocupação da faixa for maior que 15%, o algoritmo de controle passa a monitorar a velocidade média a fim de definir se é necessário o uso da harmonização da velocidade.

Resultados de estudos de caracterização das condições operacionais das rodovias, considerando a velocidade limite, as variações da velocidade com o fluxo, volumes e velocidades críticas que precedem a ocorrência de colapso no fluxo, são importantes para a personalização de algoritmos de controle em sistemas de harmonização de velocidade.

Os procedimentos operacionais que controlam a abertura e fechamento do acostamento para o tráfego são fortemente regulados por critérios de segurança. Este procedimento é iniciado após a ativação da harmonização de velocidade. Questões como a verificação da inexistência de obstáculos ou veículos parados no acostamento são fundamentais e prioritárias. Uma rotina de controle para o uso temporário do acostamento, proposta pelo Federal Highway Administration (2007) envolve os seguintes passos:

- Passo 1: Verifica se a harmonização da velocidade está ativada;
- Passo 2: Verifica se o acostamento está livre de objetos e veículos parados. Se o acostamento estiver livre, seguir para o Passo 3. Caso contrário, repetir o Passo 2 após um período pré-determinado;
- Passo 3: Abrir o acostamento para uso temporário;
- Passo 4: Se os fluxos médios nas faixas (ou fluxo média da via) são menores que um valor pré-determinado, fechar o acostamento para uso temporário.

## **5 CONDIÇÕES DE INFRAESTRUTURA DAS RODOVIAS COM GERENCIAMENTO ATIVO DE TRÁFEGO**

As condições de infraestrutura das rodovias que possuem gerenciamento ativo de tráfego são diferentes entre si. Segundo a Federal Highway Administration (2011a), cada um dos países adota seus próprios padrões para dimensionamento dos elementos da infraestrutura relevantes na prática do gerenciamento ativo de tráfego. Entre os principais elementos da rodovia envolvidos no gerenciamento ativo de tráfego, destacam-se: a quantidade e largura das faixas; largura dos acostamentos; o distanciamento entre pórticos de sinalização; a presença de iluminação contínua na via e; o distanciamento entre os refúgios.

Com a utilização do acostamento como faixa de rolamento, refúgios são necessários para que os veículos tenham uma área para parada de emergência fora da faixa de rodagem. Refúgios na Inglaterra possuem um padrão de 100 metros de comprimento e 4,6 metros de largura. Na Inglaterra e na Holanda há iluminação contínua das rodovias onde o gerenciamento ativo de tráfego foi implantado. Nos Estados Unidos os pórticos e os limites de velocidades são usados apenas em pontos estratégicos e nos entornos das cidades. Orientações de novos projetos na Alemanha e na Holanda especificam larguras de faixa de 3,5 metros (Federal Highway Administration, 2011a).

A Tabela 3 apresenta uma síntese das condições de infraestrutura das rodovias com gerenciamento ativo de tráfego (Federal Highway Administration, 2011a).

**Tabela 3:** Condições de infraestrutura das rodovias com gerenciamento ativo de tráfego

Rodovia	Nº Faixas	Largura da Faixa (m)	Largura do Acostamento Interno e Externo (m)	Largura da Faixa de Uso do Acostamento (m)	Distância Média Entre Pórticos (m)	Iluminação	Distância Média Entre Refúgios
<b>M42 – Inglaterra</b>	3	(3.3 a 3.7)* (3.5 a 3.6)	(0.6 a 1.2)*	(3.3 a 3.7)* (3.5 a 3.6)	500 a 800	sim	500 a 800
<b>M25 – Inglaterra</b>	3	(3.3 a 3.7)* (3.5 a 3.6)	(0.6 a 1.2)*	(3.3 a 3.7)* (3.5 a 3.6)	500 a 800	sim	500 a 800
<b>M4 / M5 / M6 – Inglaterra</b>	3	(3.3 a 3.7)* (3.5 a 3.6)	(0.6 a 1.2)*	(3.3 a 3.7)* (3.5 a 3.6)	500 a 800	sim	500 a 800
<b>A5 – Alemanha</b>	3	(3.25 a 3.75)* (3,75)	(0,5 a 0,75)*	(3.25 a 3.75)*	1000	não	1000
<b>A1 / A3 / A4 / A7 / A99 – Alemanha</b>	2	(3.25 a 3.75)* (3,75)	(0,5 a 0,75)*	(3.25 a 3.75)*	1000 a 3000	não	1000
<b>A2 – Holanda</b>	4 e 6	(3.3 a 3.7)* (3,5)	(0,5 a 2.5)*	(3.05 a 3.5)*	600	sim	1000
<b>A27 – Holanda</b>	3 e 4	(3.3 a 3.7)* (3,5)	(0,5 a 2.5)*	(3.05 a 3.5)*	600	sim	1000
<b>A4 / A12 / A13 / A15 / A16 / A17 / A20 / A29 – Holanda</b>	3	(3.3 a 3.7)* (3,5)	(0,5 a 2.5)*	(3.05 a 3.5)*	600	sim	1000
<b>I-5 – Estados Unidos</b>	4	(3.66)*	(0,61 a 1.22)*	(3.66)*	-	não	-
<b>I-66 – Estados Unidos</b>	3	(3.66)*	(0,61 a 1.22)*	(3.35)*	-	não	-
<b>I-35W – Estados Unidos</b>	3 e 4	(3.66)*	(0,61 a 1.22)*	(3.66)*	800	não	-

(\*)Larguras de Projeto. ( ) Larguras Usadas com Grande Frequência.

## 6 CONCLUSÕES

Uma revisão bibliográfica das tendências atuais do gerenciamento ativo de tráfego foi apresentada, trazendo as estratégias usadas na Europa e Estados Unidos para melhorar a segurança, diminuir o congestionamento, diminuir a variabilidade das velocidades, aumentar a capacidade e melhorar a confiabilidade das viagens nas autoestradas. Este artigo também apresentou uma revisão das condições de infraestrutura das rodovias que possuem gerenciamento ativo de tráfego.

O gerenciamento ativo de tráfego consegue simultaneamente abordar questões de mobilidade, capacidade e segurança. Porém, há a necessidade de adequar estas novas estratégias com as já existentes para garantir a operacionalidade do sistema, e garantir a total aplicação das novas técnicas. Deve haver também uma preocupação com a legislação, para que ela possa contemplar estas novas estratégias.

Para que o gerenciamento ativo de tráfego tenha sua plena aplicação, é preciso ter uma infraestrutura que suporte as estratégias, e que possua a tecnologia e os equipamentos necessários para sua operação. Além disso, uma combinação de todas as estratégias operacionais pode maximizar os efeitos na rede de transporte.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allaby, P., B. Hellings e M. Bullock (2007) *Variable Speed Limits: Safety and Operational Impacts of a Candidate Control Strategy for Freeway Applications*. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems 8, No. 4, pp. 671-680.
- Carlson, R. C., et al. (2010) *Optimal motorway traffic flow control involving variable speed limits and ramp metering*. Transportation Science, Vol. 44, pp. 238-253, Estados Unidos.
- Chang, G. L.; S. Y. Park e J. Paracha (2011) *ITS Field Demonstration: Integration of Variable Speed Limit Control and Travel Time Estimation for a Recurrently Congested Highway*. CD 90<sup>th</sup> Transportation Research Board Annual Meeting, Paper 11-1206, Washington D.C., Estados Unidos.
- Federal Highway Administration (2005) *Managed Lanes Handbook*. Texas Transportation Institute, Report 0-4160-24, Estados Unidos.
- Federal Highway Administration (2007) *Active Traffic Management: The Next Step in Congestion Management*. Alexandria, VA: American Trade Initiatives. FHWA-PL-07-012, Estados Unidos.
- Federal Highway Administration (2011a) *Freeway Geometric Design for Active Traffic Management in Europe*. Alexandria, VA: American Trade Initiatives. Report FHWA-PL-11-004, Estados Unidos.
- Federal Highway Administration (2011b) *Integrated Active Traffic and Travel Demand Management: A Holistic Approach to Congestion Management*. Alexandria, VA: American Trade Initiatives. FHWA-PL-11-011, Estados Unidos.
- Geistefeldt, Justin (2011) *Capacity Effects of Variable Speed Limits on German Freeways*. Transportation Research Board, 6th International Symposium on Highway Capacity and Quality of Service pág. 48-56, Estados Unidos.
- Geistefeldt, Justin (2012) *Operational Experience With Temporary Hard Shoulder Running in Germany*. Transportation Research Board Annual Meeting, Paper 12-3090, Washington D.C., Estados Unidos.
- Grant, David (2007) *Case Study: M42 Active Traffic Management*. Highways Agency, Inglaterra.
- Highways Agency (2007) *Ramp Metering Summary Report*. Highways Agency Publications, Inglaterra.
- Jacobsen, L. e T. Farradyne (2008) *Active Traffic Management: Efforts in the Seattle Area*. ITS Washington Panel Session. Washington State Department of Transportation, Estados Unidos.
- Kaveshgar, N.; N. Huynh e Y. Xie (2010) *A Decentralized Multi-Agent Systems Approach to Ramp Metering*. CD 90<sup>th</sup> Transportation Research Board Annual Meeting, Paper 11-3859, Washington D.C., Estados Unidos.
- Kuhn, B. (2008) *Smart Traffic 2008: Active Congestion Management – Infrastructure and Operations, Session 3: Active Traffic Management*. 5<sup>th</sup> Conference in The Series, Brisbane, Australia.
- Lee, C. e M. Abdel-Aty (2008) *Testing Effects of Warning Messages and Variable Speed Limits on Driver Behavior Using Driving Simulator*. Journal of the Transportation Research Board, Nº 2069, Transportation Research Board, Washington D.C., pp. 55–64, Estados Unidos.
- Lin, O. W.; K. P. Kang e G. L. Chang (2004) *Exploring the Effectiveness of Variable Speed Limit Controls on Highway Work-Zone Operations*. IEEE Intelligent Transportation Systems, VOL 8, pp. 1–14, Estados Unidos.
- Middelham, Frans (2006) *Dynamic Traffic Management*. Overview by Handbook: Sustainable Traffic Management. Rijkswaterstaat - AVV Transport Research Centre, Holanda.

- Nezamuddin, N., et al. (2011) *Traffic Operations and Safety Benefits of Active Traffic Strategies on TxDOT Freeways*. Federal Highways Administration, Publication Number: FHWA/TX-12/0-6576-1, Estados Unidos.
- Sisiopiku, P. V.; A. Sullivan e G. Fadel (2009) *Implementing Active Traffic Management Strategies in the U.S.*. University Transportation Center for Alabama, Birmingham, Alabama, Estados Unidos.
- Sparmann, Jurg. M. (2007) *Active Traffic Management: Experiences made in Hessen*. Workshop on Active Traffic Management. Seattle, Estados Unidos.
- Stewart, P. (2003) *Ramp Metering Study*. SIAS Limited Final Report TPRAMP2/55129, Dundee, Inglaterra.
- Texas Department of Transportation (2002) *LBJ Managed Lanes: Traffic and Revenue Study*. Texas, TX, Estados Unidos.
- Ungemah, D. e B. Kuhn (2009) *Special Use of Shoulders for managed lanes*. Texas Transportation Institute, Texas, Estados Unidos.
- Washington State Department of Transportation (2007). *Active Traffic Management (ATM) Feasibility Study*. Washington D.C., Estados Unidos.

### **3. ARTIGO 2**

CALIBRAÇÃO DE UM SEGMENTO ESPECIAL DE AUTOESTRADA ATRAVÉS DO  
SOFTWARE VISSIM

# CALIBRAÇÃO DE UM SEGMENTO ESPECIAL DE AUTOESTRADA ATRAVÉS DO SOFTWARE VISSIM

**Felipe Caleffi**

**Helena Beatriz Bettella Cybis**

Laboratório de Sistema de Transportes – LASTRAN  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS

## RESUMO

Este texto apresenta o esforço de calibração através do software VISSIM de um segmento especial de autoestrada. O trecho em estudo possui um segmento que apresenta um aumento no número de faixas devido a uma estrutura de pedágio desativada onde não há paradas e nem obrigatória redução de velocidades. O trecho também possui velocidades e intensidades de fluxo diferentes para cada faixa de tráfego, e um aumento do número de trocas de faixa em virtude do alargamento decorrente da praça de pedágio. A calibração do modelo foi um estágio importante da modelagem, pois este é um segmento com características especiais que não é naturalmente reproduzido pelo simulador. O tempo de *headway*, a distância mínima entre os veículos, a agressividade nas trocas de faixa, nas acelerações e desacelerações foram os parâmetros com maior influência na modelagem. Dados coletados através de filmagens e de coletores com laços indutivos foram usados para calibrar e validar o modelo de simulação.

## ABSTRACT

This paper presents a calibration effort of the software VISSIM for a special segment of freeway. The section under study has a segment which shows an increase in the number of lanes due to a disabled toll structure where there are no stops and no reduction of mandatory speeds. The section also has different flow and velocities for each traffic lane, and an increasing number of lane changes due to an enlargement in the toll plaza. The calibration of the model was an important stage of modeling, because this is a segment with special features that are not naturally reproduced by the simulator. The headway time and the minimum distance between vehicles, the aggressiveness in lane changes, and in accelerations and decelerations, are the parameters that influence most the model. Data collected through filming and collectors with inductive loops were used to calibrate and validate the simulation model.

## 1. INTRODUÇÃO

A micro simulação é uma ferramenta capaz de reproduzir diversos cenários reais de tráfego, e é amplamente usada na elaboração de estudos e desenvolvimento de projetos em engenharia de transportes. Os modelos de simulação são especialmente úteis quando as estratégias em análise exigem novas construções ou investimentos onerosos. No entanto, a chave para avaliações de sucesso depende da validade do modelo de simulação microscópica (Park e Qi, 2006).

Para que os modelos de simulação pareçam reais, é necessário calibrar e validar estes modelos. A calibração é definida como o processo pelo qual os componentes individuais do modelo passam por ajustes, com o objetivo de representar precisamente medições de campo ou condições de tráfego observadas. Os componentes ou parâmetros de um modelo de simulação que requerem ajustes incluem os parâmetros de comportamento dos condutores, características de fluxo de tráfego e velocidades e operações de controle. A validação do modelo testa a precisão da modelagem, comparando dados gerados pelo modelo de simulação

com medições de campo. A validação está diretamente relacionada com o processo de calibração, porque ajustes na calibração são necessários para melhorar a capacidade do modelo de representar as condições de campo (Park e Schneeberger, 2003).

Este artigo apresenta o esforço de calibração e análise de um segmento especial de autoestrada com uma praça de pedágio desativada, onde não há paradas e nem obrigatória redução de velocidades. Neste segmento existe um aumento do número de faixas, e interferência causada pelo acesso a um posto de conveniência. Devido ao estreitamento das faixas nas cancelas remanescentes da estrutura de cobrança, há uma natural redução de velocidade. A porcentagem de ocupação das faixas na praça de pedágio varia de acordo com a intensidade de fluxo. Esta variação gera perturbação no final deste segmento especial, onde a autoestrada volta a ter um número menor de faixas de rolamento, caracterizando um gargalo. Além da praça de pedágio, existe um segmento normal de autoestrada com três faixas de rolamento, em que as velocidades médias e intensidades de fluxo são diferentes para cada faixa de tráfego. O esforço de modelagem apresentado neste artigo tem como objetivo representar as características de comportamento do trecho em estudo e estudar o comportamento da rodovia nos períodos que antecedem os congestionamentos.

A seção 2 deste artigo apresenta o estudo de caso, e o levantamento dos dados coletados no trecho em estudo. A seção 3 apresenta o software VISSIM e seus parâmetros de calibração. A seção 4 apresenta o processo de calibração e validação do VISSIM para o estudo de caso. Conclusões são apresentadas na seção 5.

## 2. ESTUDO DE CASO

Como estudo de caso, foi selecionado o segmento correspondente aos quilômetros 15 a 20 da rodovia BR-290. Neste trecho em estudo, há uma praça de pedágio localizada após o km 19 que possui quatro faixas de rolamento, e uma quinta faixa para acesso a um posto de conveniência. O restante do trecho em estudo possui três faixas de rolamento. Cada faixa de rolamento possui largura de 3,75 metros cada. Os limites de velocidade para o trecho em estudo são de 110 km/h para veículos leves e 90 km/h para veículos pesados. A Figura 1 apresenta o segmento de rodovia modelado, com destaque para a praça de pedágio. A primeira faixa da esquerda é chamada de Faixa 1, sucessivamente até a primeira faixa da direita, chamada de Faixa 4.



**Figura 1:** Segmento de rodovia modelado

Visualmente, é possível notar que o comportamento do tráfego na rodovia não é homogêneo. Cada faixa de tráfego possui médias de velocidades, intensidades de fluxo e composições de tráfego diferentes. Os softwares de micro simulação, com seus parâmetros *default*, distribuem de forma uniforme entre as faixas de tráfego as velocidades, intensidades de fluxo e as composições. Com isso, os modelos de simulação não são capazes de reproduzir naturalmente o trecho em estudo, fazendo-se necessário um esforço de calibração para representar de forma satisfatória as características presentes na rodovia.

Na praça de pedágio, existe isenção de pagamento, e com isso não há paradas obrigatórias. Devido ao estreitamento das faixas nas cancelas remanescentes da estrutura de cobrança, há uma natural redução de velocidade. Esta redução das velocidades gera ondas de choque em períodos de grande intensidade de fluxo, e as ondas de choque se propagam a montante causando perturbações em grande extensão da autoestrada. Outro ponto com potencial para gerar congestionamentos é a redução do número de faixas existente após a praça de pedágio, onde a rodovia volta a ter três faixas de tráfego.

## 2.1 Levantamento de Dados

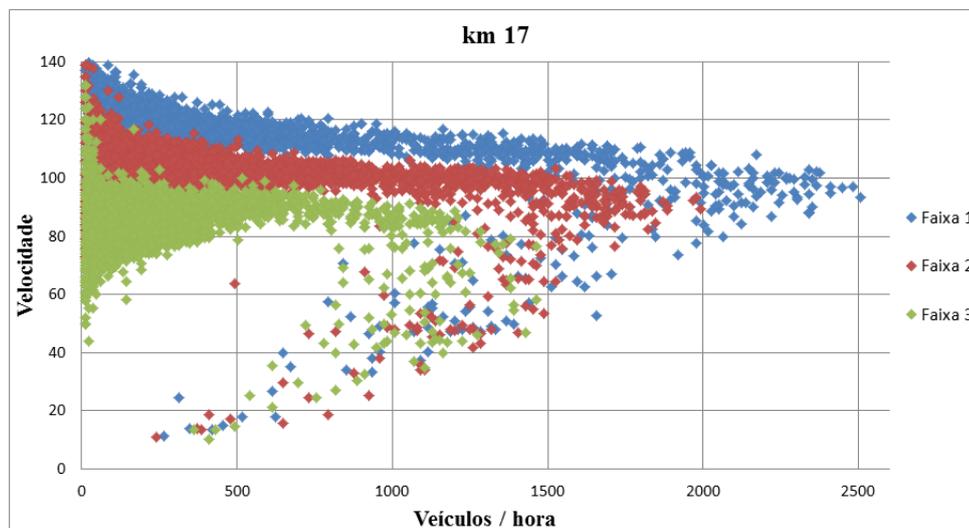
Os dados foram extraídos de coletas feitas através de laços indutivos e de filmagens, provenientes do km 17, km 19 e da praça de pedágio. Dados relativos à praça de pedágio foram coletados no mês de Fevereiro de 2012. Outro conjunto de dados, relativos ao km 17 e km 19, são provenientes do período de 18 de Setembro a 05 de Novembro de 2012. A rodovia recebe elevados fluxos no período do verão e em feriados importantes e, com isso, acontecem as maiores variabilidades de velocidades e intensidades de fluxo. Esse fluxo elevado é proveniente da rodovia RS030, que tem cruzamento com a BR290 no km 01, e da BR101. Ambas fazem a ligação do litoral a BR290. Foram coletados dados sobre velocidades e fluxos para automóveis, caminhões, ônibus. Dados de coletores com laços indutivos são provenientes dos km 17 e 19, e os coletados através de filmagens são provenientes de uma câmera instalada na praça de pedágio.

A Tabela 1 apresenta as velocidades de fluxo livre dos veículos, a partir dos dados coletados através do km 17 e km 19. Estas velocidades de fluxo livre são necessárias para calibração do modelo de simulação, a fim de representar as velocidades desejadas dos condutores.

**Tabela 1:** Velocidades de fluxo livre dos veículos

	Velocidade Mínima (km/h)			Velocidade Média (km/h)			Velocidade Máxima (km/h)		
	Faixa 1	Faixa 2	Faixa 3	Faixa 1	Faixa 2	Faixa 3	Faixa 1	Faixa 2	Faixa 3
<b>Automóvel</b>	68,0	52,0	51,0	116,10	104,00	87,00	172,0	184,0	147,0
<b>Caminhão</b>	83,0	65,0	41,0	98,65	90,64	81,00	117,0	122,0	117,0
<b>Ônibus</b>	-	82,0	77,0	-	89,45	89,39	-	101,0	104,0

A Figura 2 apresenta a relação fluxo x velocidade para observações do período de 18 de Setembro a 05 de Novembro de 2012, coletadas através de laços indutivos no km 17, onde há três faixas de tráfego. A composição de dados está agrupada em intervalos de 5 minutos.



**Figura 2:** Relação fluxo x velocidade para observações do período de 18 de Setembro a 05 de Novembro, coletadas no km 17

Existe uma diferença significativa entre as velocidades e intensidades de fluxo das três faixas. A primeira faixa da esquerda – Faixa 1, apresenta as maiores velocidades e volumes, enquanto a Faixa 3 apresenta as menores velocidades e volumes. Um ponto importante é o fato de que a Faixa 3 recebe grande parte do tráfego de caminhões e ônibus, o que influencia na redução da intensidade de fluxo e das velocidades, uma vez que os limites de velocidade são diferentes para veículos leves e pesados. Nesta faixa também predominam o tráfego de veículos leves lentos que trafegam com velocidades muito inferiores às regulamentadas.

O km 19 possui comportamento semelhante ao km 17, com respeito às intensidades de fluxo e composições de tráfego. Apenas as médias de velocidade do km 19 são um pouco menores, pois neste ponto há o alargamento da rodovia devido ao segmento de pedágio. Para grandes intensidades de fluxo, as ondas de choque geradas pela perturbação da praça de pedágio se propagam a montante, causando uma pequena redução nas médias de velocidade para altos volumes.

A Tabela 2 apresenta as porcentagens dos fluxos e as velocidades máximas, médias e mínimas dos veículos nas quatro faixas da praça de pedágio, para baixos volumes de tráfego. A porcentagem de veículos que entram no acesso ao posto de conveniência é de 3%. À medida que as intensidades de fluxo aumentam, as porcentagens dos fluxos das Faixas 1 e 2 tendem a ser equivalentes, e cada uma das faixas passam a ter cerca de 30% do fluxo. O mesmo acontece para as Faixas 3 e 4, que passam a ter cerca de 20% do fluxo cada. Isto ocorre devido ao fato de que para baixos volumes, os veículos fazem poucas trocas de faixa, e com isso a Faixa 4 é pouco usada. Com o aumento do volume, os veículos tendem a se distribuir entre todas as faixas, com o objetivo de evitar filas e aumentar sua velocidade.

**Tabela 2:** Porcentagens dos fluxos e velocidades médias na praça de pedágio, para baixas intensidades de fluxo

	Veículos/hora (%)	Velocidade Mínima (km/h)	Velocidade Média (km/h)	Velocidade Máxima (km/h)
<b>Faixa 1</b>	36,65	50,0	72,45	100,0
<b>Faixa 2</b>	32,40	47,0	71,02	111,0
<b>Faixa 3</b>	18,79	43,0	60,06	95,0
<b>Faixa 4</b>	9,16	47,0	63,94	87,0

### 3. PARÂMETROS DE CALIBRAÇÃO NO VISSIM

A calibração é uma etapa fundamental na simulação de tráfego. Na calibração, são definidos os ajustes dos parâmetros do modelo para refletir com precisão as condições preexistentes da rede viária. Os parâmetros de calibração com maior impacto na modelagem são usualmente a agressividade na troca de faixas dos veículos, o comportamento de *car following*, aceitação de brechas, escolha de rotas e, distribuições de velocidade e aceleração dos veículos (Woody, 2006).

Através de uma revisão de trabalhos de modelagem, Gettman e Head (2003) apontam que o VISSIM possui um melhor controle de interseções e de trocas de faixa, além de possuir um maior número de parâmetros de *car following*, se comparado aos softwares Corsim, Simtraffic, Hutsim, Paramics, Integration, Aimsun, Watsim e Texas. Um bom controle de trocas de faixa e de *car following* é essencial para a modelagem deste estudo, uma vez que para altas intensidades de fluxo estes parâmetros possuem grande influência no comportamento do trecho em estudo.

O algoritmo de *car following*, desenvolvido por Wiedemann (1974), apresenta características psicofísicas, enquanto as trocas de faixas são determinadas por um algoritmo baseado em regras. O VISSIM possui dois algoritmos de *car following*, um para tráfego urbano e um para tráfego rodoviário. O modelo também usa uma função com distribuição estocástica de velocidades desejadas, peso e potência dos veículos completamente editável (PTV, 2010). Estas distribuições de velocidades permitem uma representação mais adequada do comportamento dos veículos, conforme os dados observados.

O VISSIM possui um modelo algoritmo de *car following* específico para rodovias representado pelo modelo de Wiedemann-99, versão atualizada do algoritmo de Wiedemann-91, onde a velocidade e a proximidade com que veículos trafegam são variáveis predominantes na determinação de capacidades. Detalhes do modelo são apresentados por Wiedemann e Reiter (1991) e Fellendorf e Vortisch (2001). De acordo com PTV (2010), o modelo de *car following* Wiedemann-99 possui dez parâmetros ajustáveis:

- CC0: Distância de parada, em metros; É a distância desejada entre o veículo líder e veículo seguidor à velocidade de 0 km/h;
- CC1: Tempo de *headway*, em segundos. É o tempo desejado em segundos, entre o veículo líder e veículo seguidor;

- CC2: Variação de *following*, em metros. Restringe a oscilação longitudinal da distância de segurança entre os veículos, sendo um incremento de espaçamento para a distância de segurança desejada;
- CC3: Espaçamento para entrar em *following*, em segundos. É o tempo antes de o veículo iniciar a desaceleração para atingir a distância de segurança;
- CC4 e CC5: Limites de *following* positivo e negativo. Parâmetro adimensional, e influencia a aproximação entre o veículo seguidor e o veículo líder, controlando a diferença de aceleração entre estes dois veículos;
- CC6: Velocidade dependente da oscilação. Representa a influência da distância na oscilação da velocidade dos veículos no processo de *following*;
- CC7: Oscilação da Aceleração. É a aceleração real durante o processo de oscilação;
- CC8: Aceleração quando parado. É a aceleração desejada de um veículo quando este estiver começando a se movimentar;
- CC9: É a aceleração desejada a 80 km/h.

A literatura reporta diversos estudos envolvendo a calibração do modelo VISSIM para ambientes rodoviários. Segundo Vallati (2010), os parâmetros de *car following* CC0, CC1, CC2, CC4 e CC5, além do parâmetro “fator de redução de distância segura (FRDS)” contido nos parâmetros de troca de faixas são considerados importantes para modelagem. O “fator de redução de distância segura (FDRS)” reflete na agressividade dos condutores quando estão efetuando troca de faixas. Gomes et. al. (2004) e Lownes e Machemehl (2006), sugerem que os parâmetros de *car following* CC0, CC1, CC4 e CC5, e as “desacelerações máximas” nos parâmetros de trocas de faixas são suficientes para modelar de forma satisfatória os ambientes rodoviários. Manneni et. al. (2008), sugere que os parâmetros de *car following* CC1, CC2, CC3, CC4 e CC5 sejam calibrados.

Em uma revisão da calibração dos parâmetros de *car following* do software VISSIM para este mesmo trecho de estudo, Oliveira e Cybis (2008) identificaram como relevantes para calibração os parâmetros CC0, CC1, CC4 e CC5. Este estudo de Oliveira e Cybis (2008) foi conduzido para intensidades de fluxo entre 2312 veic./hora e 2680 veic./hora, que não representam as condições de operação da rodovia próximas à capacidade.

#### 4 CALIBRAÇÃO DO ESTUDO DE CASO

Para a calibração do estudo de caso não foram alteradas características *default* dos veículos como tamanho, peso, e perfis de acelerações e desacelerações. Apenas foram alteradas as distribuições de velocidade dos veículos, e a distribuição de potência dos automóveis, para que esta fosse compatível com o perfil dos veículos brasileiros. Como o trecho em estudo apresentou dois segmentos com comportamentos distintos durante a coleta de dados, o modelo de simulação foi calibrado com duas distribuições de velocidades desejadas. O primeiro segmento, que inicia no km 15 e segue até a praça de pedágio, apresentou distribuições de velocidade cujas velocidades são apresentadas na Tabela 1. O segundo segmento, que representa a praça de pedágio, recebeu as distribuições de velocidade que são apresentadas na Tabela 2.

Após calibrar as distribuições de velocidade e potência dos veículos, foram calibrados os parâmetros de comportamento dos condutores. Esta calibração do comportamento dos condutores foi dividida em três etapas: (1) análise de sensibilidade – para definir quais

parâmetros devem receber calibração bem como uma faixa de valores aceitáveis para cada parâmetro; (2) análise combinatória – para determinar todas as combinações possíveis de valores entre os parâmetros a serem calibrados; (3) validação dos dados através de uma função objetivo que determina a porcentagem do erro relativo entre os dados coletados em campo e os dados modelados.

#### 4.1 Análise de Sensibilidade dos Parâmetros de Calibração

Uma análise de sensibilidade foi conduzida para os parâmetros de comportamento dos condutores, com o objetivo de determinar quais parâmetros têm impacto sobre a modelagem do trecho em estudo e, conseqüentemente, devem receber calibração. Foram realizadas análises para os parâmetros de troca de faixas e de *car following*. Esta análise foi feita através de uma combinação dos parâmetros apontados na bibliografia como importantes para a representação de ambientes rodoviários.

Simulações com combinações de valores destes parâmetros foram feitas para encontrar os parâmetros que necessitam de calibração, e quais devem manter seus respectivos valores *default*. Nestas simulações também foi definida uma faixa aceitável de valores para estes parâmetros.

A Tabela 3 apresenta os parâmetros de troca de faixas e de *car following* que influenciam na modelagem e que devem receber calibração, bem como a faixa de valores aceitáveis cada parâmetro que foi variado. O passo de incremento com que cada parâmetro foi variado é de 0,1. O único parâmetro de troca de faixas com influência na modelagem foi o “Fator de redução de distância segura (FRDS)”.

**Tabela 3:** Parâmetros a serem calibrados e suas faixas de valores aceitáveis

<i>Car Following</i>		Troca de Faixas	
Parâmetros	Faixa de Valores	Parâmetros	Faixa de Valores
CC1	0,7 a 0,8	FRDS	0,3 a 0,4
CC2	2,4 a 2,7		
CC3	4,9 a 5,2		
CC4	0,5 a 0,8		
CC5	0,5 a 0,8		

#### 4.2 Análise Combinatória dos Parâmetros Calibrados

Análise combinatória é a parte da matemática que estuda métodos de contagem, de combinação numérica entre conjuntos finitos. Esta análise permite calcular de forma direta o número de possibilidades existentes em um conjunto de valores (Ferreira, 2009).

Com a análise de sensibilidade conduzida sobre os parâmetros de comportamento dos condutores foi possível determinar uma faixa de possíveis valores que podem ser atribuídos a cada um dos parâmetros na calibração. A partir disto, uma análise combinatória foi conduzida para determinar todas as possibilidades de combinação para cada faixa de valores. Esta

análise determinou 256 combinações possíveis. Como o VISSIM é um modelo de simulação microscópico e estocástico, um pequeno número de rodadas (três replicações) foi conduzido para cada possível combinação de valores, a fim de determinar a melhor combinação de valores dos parâmetros, e melhor representar o comportamento dos condutores no modelo de simulação.

#### 4.2.1 Troca de Faixas

A calibração conduzida sobre os parâmetros de troca de faixas no VISSIM foi realizada para melhor representar o comportamento dos condutores nas trocas de faixas que acontecem principalmente no início da praça de pedágio onde ocorrem as reduções das velocidades. O parâmetro “fator de redução de distância segura (FRDS)” sofreu modificações com o objetivo de encontrar o valor que melhor representa a agressividade dos condutores durante trocas de faixa. Este parâmetro é fundamental para a modelagem, pois a agressividade dos condutores neste estudo de caso possui uma diferença significativa se comparada ao parâmetro *default* do VISSIM. A Tabela 4 apresenta o único parâmetro de troca de faixas que foi modificado, bem como seu respectivo valor *default*.

**Tabela 4:** Parâmetro de troca de faixas modificado

	<i>Default</i> (m/s <sup>2</sup> )		Modificados (m/s <sup>2</sup> )	
	Própria	Veículo ao lado/atrás	Própria	Veículo ao lado/atrás
<b>FRDS</b>		0,6		0,4

#### 4.2.2 Car Following

Uma análise de sensibilidade foi conduzida no modelo de *car following* Wiedemann-99 para determinar os parâmetros que influenciam na modelagem e seus valores. Os parâmetros que demonstraram ter influência no desempenho do modelo foram: CC1, CC2, CC3, CC4 e CC5. Os parâmetros CC0, CC6, CC7, CC8 e CC9 tiveram seus valores *default* mantidos, pois a análise de sensibilidade não demonstrou que estes parâmetros possuem influência sobre o desempenho do trecho em estudo.

Os parâmetros CC1, CC4 e CC5 demonstraram ter maior influência na capacidade. Os parâmetros CC4 e CC5 têm influência na agressividade dos condutores em relação à aceleração e desaceleração. Quanto menor for este valor, mais sensível é a reação do condutor às mudanças de velocidade e direção dos veículos ao seu redor.

O parâmetro CC2 determina a distância mínima de segurança entre o veículo seguidor e o líder. Já o parâmetro CC3 determina o tempo antes de o veículo seguidor iniciar a desaceleração e entrar em *following*. Estes dois parâmetros tiveram seus valores reduzidos, se comparados aos seus respectivos valores *default*, devido ao fato de que a agressividade dos motoristas neste estudo de caso é maior, fazendo com que os veículos trafeguem mais próximos. A Tabela 5 apresenta a combinação de parâmetros de *car following* considerada ideal no processo de calibração com seus valores modificados, e seus respectivos valores *default*.

**Tabela 5:** Parâmetros de *car following* que foram modificados

	<b>Default</b>	<b>Modificados</b>
<b>CC1</b>	0,90 segundos	1,10 segundos
<b>CC2</b>	4,00 metros	2,50 metros
<b>CC3</b>	-8,00	-5,00
<b>CC4</b>	-0,35	-0,70
<b>CC5</b>	0,35	0,70

### 4.3 Validação dos Dados

A análise da adequação dos parâmetros de calibração foi realizada através de uma comparação dos dados coletados com os dados provenientes do modelo de simulação. Os dados coletados com laços indutivos, utilizados para a validação do segmento básico da rodovia, são provenientes dos km 17 e 19. Esta comparação é feita através de uma função objetivo, ou *fitness*, que determina a porcentagem do erro relativo entre as medidas de desempenho obtidas em campo e pelo simulador calibrado. Foram comparadas as velocidades médias dos dados coletados nos km 17 e km 19, com as velocidades médias do modelo calibrado para os mesmos pontos de coleta.

Como o objetivo desta modelagem é estudar o comportamento da rodovia e calibrar o modelo de simulação para períodos que antecedem os congestionamentos, a função objetivo considerou apenas a faixa de velocidades onde a intensidade de fluxo estava acima de 4000 veic./hora. A Equação 1 apresenta a função para determinar o valor *fitness* (erro relativo):

$$F(\textit{Fitness}) = \left( \frac{|V.M.\textit{Coletada} - V.M.\textit{Modelada}|}{V.M.\textit{Coletada}} \right) * 100 \quad (1)$$

Onde:

F(*Fitness*) = Porcentagem do erro relativo;

V.M.<sub>Coletada</sub> = Velocidade média dos dados coletados;

V.M.<sub>Modelada</sub> = Velocidade média do modelo de simulação.

### 4.4 Comentários Gerais Sobre o Processo de Calibração

Cenários de simulação com baixas, médias e altas intensidades de fluxo foram modelados. Para os cenários de simulação com baixas e médias intensidades de fluxo os parâmetros de calibração demonstraram não ter tanta influência na modelagem. Para altos volumes, os parâmetros de calibração possuem influência significativa na modelagem, principalmente na capacidade e na representação das trocas de faixa.

Para baixas e médias intensidades de fluxo os veículos trafegam na maior parte do tempo com bastante liberdade, permitindo aos condutores imprimir velocidades próximas da desejada. Conseqüentemente, as trocas de faixas acontecem com maior facilidade e os parâmetros de

*car following* passam a ter menor impacto devido às condições confortáveis de tráfego. O único parâmetro que demonstrou ter influência significativa na modelagem de baixas e médias intensidades de fluxo foi o parâmetro de troca de faixas “fator de redução de distância segura (FRDS)”, pois ele é importante para representar a agressividade dos condutores nas trocas de faixa e ultrapassagens.

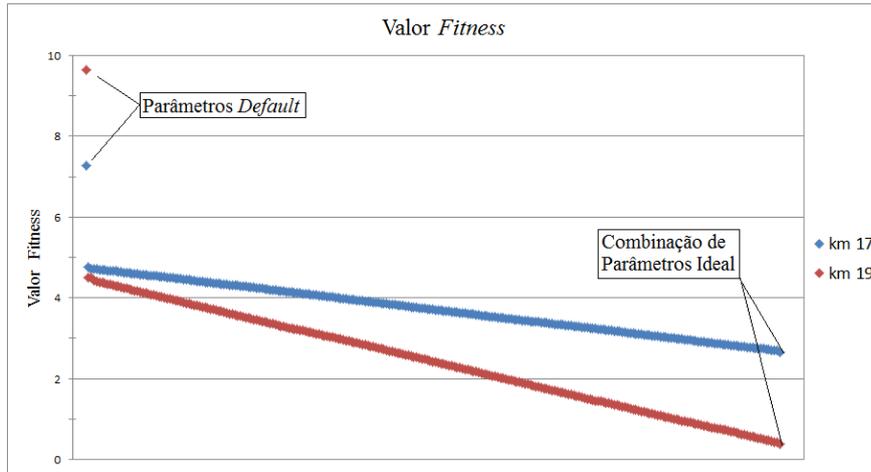
Como parte do processo de codificação do modelo, foram definidas as distribuições de velocidades desejadas para as diversas categorias de veículos com base nos dados de velocidade coletados em condição de fluxo livre. Esta codificação das distribuições é fundamental para representar de forma satisfatória o trecho em estudo, uma vez que na maior parte do tempo os veículos trafegam em condições confortáveis de tráfego, e assim podem imprimir suas velocidades desejadas. Nas condições de fluxo livre, os parâmetros de *car following* e troca de faixas tem menor impacto na modelagem.

A validação da calibração do modelo foi conduzida através de uma comparação entre os dados coletados através de laços indutivos e dados do modelo de simulação calibrado, para os km 17 e 19. Através do cálculo da porcentagem do erro relativo, foi possível determinar o melhor valor *fitness* para cada ponto de coleta. A Tabela 6 apresenta as velocidades médias e os valores *fitness* para a combinação de parâmetros considerada ideal para o modelo de simulação, e os valores *fitness* para o modelo com os parâmetros *default* de comportamento dos condutores.

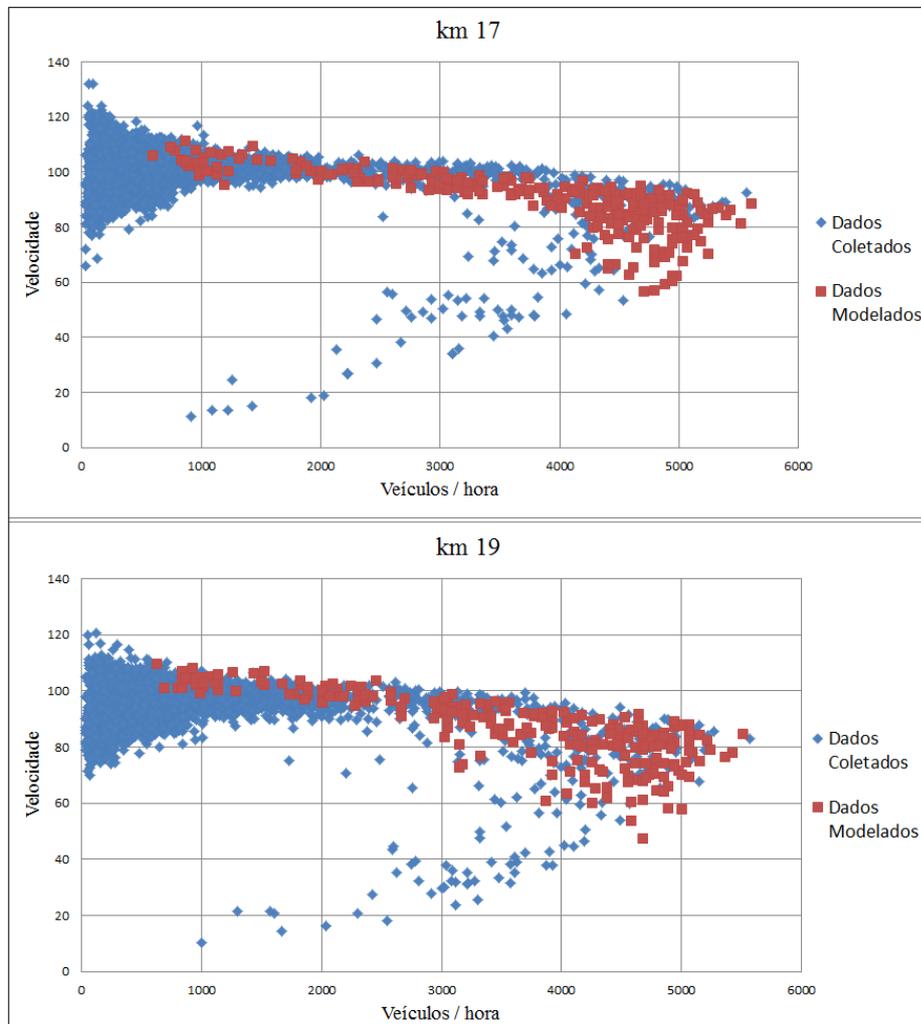
**Tabela 6:** Velocidades médias e valores *fitness*

	Combinação Ideal			Combinação Parâmetros Default	
	Vel. Média Coletada (km/h)	Vel. Média Modelada (km/h)	Valor <i>Fitness</i>	Vel. Média Default (km/h)	Valor <i>Fitness</i>
<b>km 17</b>	88,75	86,4	2,64%	82,29	7,27%
<b>km 19</b>	80,12	79,81	0,38%	72,40	9,63%

Os elevados valores *fitness* para o modelo de simulação com seus parâmetros *default* comprovam que para este estudo de caso, a calibração dos parâmetros se faz necessária, para que assim a modelagem possa representar de forma satisfatória as características do trecho em estudo. A Figura 3 apresenta a porcentagem dos valores *fitness* do modelo *default*, e de todas as 256 combinações testadas no processo de calibração. A comparação entre os dados coletados e o modelado calibrado é apresentada na Figura 4.



**Figura 3:** Porcentagem dos valores *fitness*



**Figura 4:** Comparação entre os dados coletados através de laços indutivos e dados do modelo de simulação calibrado, para os km 17 e 19

Quando a intensidade de fluxo atinge valores acima de 4000 veic./hora, a variabilidade das médias de velocidade aumenta significativamente. É neste período que ocorrem o início dos congestionamentos, e onde os parâmetros de *car following* e trocas de faixa têm sua maior influência na modelagem.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou uma revisão sobre a calibração do software VISSIM, analisando o comportamento da modelagem em um estudo de caso de um segmento especial de autoestrada com uma praça de pedágio desativada, onde não há paradas e nem obrigatória redução de velocidades. Este trabalho fornece orientação quanto aos parâmetros de calibração que precisam ser modificados, e o método usado para calibrar e validar estes parâmetros, a fim de obter uma modelagem que possa representar de forma fiel ambientes rodoviários com as características deste trecho em estudo.

A modelagem de simulação realizada indica que a praça de pedágio tem grande influência no desempenho do trecho em estudo. É através da redução das velocidades originadas pela estrutura de pedágio, e principalmente da redução do número de faixas existente no final deste segmento, que ocorrem as ondas de choque e conseqüentemente os congestionamentos. Devido ao aumento e posterior redução no número de faixas neste segmento, as trocas de faixa se intensificam, e a calibração dos parâmetros que representam estas trocas é fundamental.

Os fatores mais importantes para o bom desempenho do modelo foram a calibração dos parâmetros de trocas de faixa e de *car following*, e a calibração das distribuições de velocidade desejadas. Para cenários de simulação com baixas e médias intensidades de fluxo os parâmetros de calibração demonstraram pouca influência na modelagem, pois nestas condições, os veículos trafegam na maior parte do tempo com bastante liberdade, permitindo aos condutores imprimir velocidades próximas da desejada. Para altos volumes, os parâmetros de calibração possuem influência significativa na modelagem, principalmente na capacidade e na representação das trocas de faixa.

A validação da calibração do estudo de caso foi conduzida através de comparações dos dados coletados em campo com os dados provenientes do modelo de simulação. Através desta validação, é possível concluir que os cenários de simulação demonstraram bom comportamento, representando de forma satisfatória o trecho em estudo. Com a crescente introdução da cobrança eletrônica em praças de pedágio, estudos de casos semelhantes podem ser reproduzidos em estruturas de pedágio que passem a realizar uma proporção maior de cobranças eletrônicas, reduzindo a necessidade da parada de veículos.

### Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio da concessionária CONCEPA e da ANTT, que disponibilizaram os dados de tráfego, e agradece o apoio financeiro do CNPq, através de uma bolsa de mestrado.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Fellendorf, M. e P. Vortisch (2001) Validation of the Microscopic Traffic Flow Model Vissim in Different Real-World Situations. *80th Annual Meeting, Transportation Research Board*, Washington, D.C., Estados Unidos.
- Ferreira, W. M. (2009) Avaliação do Tratamento Dado ao Conteúdo Análise Combinatória em Livros Didáticos para o Ensino Médio. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Católica de Brasília. Brasil.
- Gettman, D. e L. Head (2003) *Surrogate Safety Measures From Traffic Simulation Models*. Federal Highways Administration, Publication Number: FHWA-RD-03-050, Estados Unidos.
- Gomes, G., May, A. e Horowitz, R. (2004) A Microsimulation Model of a Congested Freeway using Vissim. *Transportation Research Record 1876, TRB, National Research Council*, Washington D.C., pp.71-81, Estados Unidos.
- Lownes, N. e Machemehl R. (2006) Sensitivity of Simulated Capacity to Vissim Driver Behavior Parameter Modification. *Proceedings of the 85th Annual Meeting, TRB*, Washington D.C., Estados Unidos.
- Manneni, S., Sun, C. e P. Vortisch (2008) An Integrated Microscopic and Macroscopic Calibration for Psycho-Physical Car Following Models. *Proceedings of the 88th Annual Meeting, TRB*, Washington D.C., Estados Unidos.
- Oliveira, M. L. e H. B. B. Cybis (2008) Revisão da Experiência de Calibração do Software Vissim Aplicado a um Estudo de Caso de Autoestrada Brasileira. *VIII Seprosul – Semana de Engenharia de Produção Sul-Americana*, Bento Gonçalves, Brasil.
- Park, B. e H. Qi (2006) Microscopic Simulation Model Calibration and Validation for Freeway Work Zone Network – A Case Study of Vissim. *IEEE Intelligent Transportation Systems Conference*, Toronto, Canada.
- Park, B e J. D. Schneeberger (2003) Microscopic Simulation Model Calibration and Validation – Case Study of VISSIM Simulation Model for a Coordinated Actuated Signal System. *Transportation Research Record*, Paper No. 03-2531, Estados Unidos.
- PTV (2010) *Vissim User Manual – V.5.30*. Karlsruhe, Alemanha.
- Vallati, M. (2010) *Slip Ramp Spacing Design for Truck Only Lanes Using Microscopic Simulation*. Missouri University of Science and Technology, Tese de Mestrado, Estados Unidos.
- Wiedemann, R. (1974) *Simulation des Straßenverkehrsflusses*. Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen der Universität Karlsruhe, Heft 8, Alemanha.
- Wiedemann R. e U. Reiter (1991) *Microscopic Traffic Simulation: The Simulation System Mission*. PTV America Library, Acesso em 08/06/2012, disponível em:  
<[http://www.ptvamerica.com/fileadmin/files\\_ptvamerica.com/library/1970s%20Wiedemann%20VISSIM%20car%20following.pdf](http://www.ptvamerica.com/fileadmin/files_ptvamerica.com/library/1970s%20Wiedemann%20VISSIM%20car%20following.pdf)>
- Woody, T. (2006) *Calibration Freeway Simulation Models in Vissim*. Final Research Report, University of Washington, Seattle, Estados Unidos.

#### **4. ARTIGO 3**

**ANÁLISE E IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA DE GERENCIAMENTO ATIVO DE TRÁFEGO EM UM ESTUDO DE CASO DE UMA AUTOESTRADA BRASILEIRA**

# ANÁLISE E IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA DE GERENCIAMENTO ATIVO DE TRÁFEGO EM UM ESTUDO DE CASO DE UMA AUTOESTRADA BRASILEIRA

**Felipe Caleffi**

**Helena Beatriz Bettella Cybis**

Laboratório de Sistema de Transportes – LASTRAN  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS

## RESUMO

O objetivo principal deste artigo é modelar estratégias de gerenciamento ativo de tráfego em um trecho de uma autoestrada brasileira, a fim de avaliar e quantificar a eficácia destas estratégias. O gerenciamento ativo de tráfego é um sistema que gerencia dinamicamente os congestionamentos com base nas condições de tráfego existentes. O software de micro simulação de tráfego VISSIM foi usado para modelagem. As estratégias empregadas na simulação foram a de harmonização da velocidade e a do uso temporário do acostamento. A modelagem demonstrou que o gerenciamento ativo de tráfego tem impactos positivos na operação do tráfego. Redução de *headways*, redução nos tempos médios de viagem, na variabilidade dos tempos de viagem e no número de trocas de faixa foram benefícios mensurados na modelagem. Com o uso das estratégias houve também redução do tempo em que o fluxo da via permanece em colapso, aumentando a eficiência do trecho.

## ABSTRACT

The main objective of this article is to model active traffic management strategies on a stretch of a Brazilian highway in order to assess and quantify the effectiveness of these strategies. Active traffic management is a system that dynamically manages congestion based on existing traffic conditions. The micro simulation software VISSIM was used for modeling. The strategies employed in the simulation were speed harmonization and temporary hard shoulder use. The modeling showed that the active traffic management has a positive impact on traffic operation. Reduced headways, reduction in average travel time, variability in travel times and the number of lane changes were measured benefits in modeling. With the use of strategies were also reduces the time in which the flow pathway remains collapsed, increasing the efficiency of the stretch.

## 1. INTRODUÇÃO

Para ajudar a minimizar os impactos negativos dos congestionamentos nas rodovias, técnicas de gerenciamento de tráfego apoiadas em sistema inteligentes vêm sendo usadas por países com melhores condições tecnológicas. Através de sistemas integrados e respostas coordenadas, o gerenciamento ativo de tráfego pode maximizar a segurança e fluidez do fluxo, e dinamicamente gerir e controlar o tráfego com base nas condições de tráfego existentes.

O gerenciamento ativo de tráfego envolve um conjunto de técnicas que tem por objetivo gerenciar dinamicamente congestionamentos recorrentes e não recorrentes com base nas condições de tráfego existentes. Esta abordagem consiste em uma combinação de estratégias operacionais que, quando implantadas em conjunto, ajudam a aperfeiçoar a operação da

infraestrutura existente e oferecem benefícios mensuráveis para a rede de transporte (Federal Highway Administration, 2007).

Um sistema de gerenciamento ativo de tráfego consiste tipicamente de: um conjunto de sensores de tráfego para coletar dados sobre fluxos, ocupação e velocidades da via, necessários para determinar as condições de tráfego; painéis de mensagem variável; e uma unidade central de processamento para executar ações de controle. Painéis de mensagem variável são usados em pórticos para informar os condutores das condições de tráfego e para mostrar os limites de velocidade impostos (Lin et al., 2004).

Os objetivos principais do gerenciamento ativo de tráfego são: reduzir o congestionamento; reduzir a variabilidade das velocidades; reduzir o stress dos usuários; aumentar a capacidade; tornar o tempo de viagem mais confiável; melhorar a segurança, reduzindo o número e a gravidade dos acidentes; tornar o tempo de resposta mais rápido em acidentes; e possibilitar uma informação cada vez maior para os usuários (Grant, 2007). Avaliações dos impactos de implantação do gerenciamento ativo de tráfego podem ser encontradas em (Middelham, 2006), (Federal Highway Administration, 2007), (Carlson et. al., 2010), (Geistefeldt, 2012) e (Vadde et. al., 2012).

As principais estratégias do gerenciamento ativo de tráfego incluem a harmonização da velocidade e o uso temporário do acostamento. Harmonização da velocidade envolve a redução dos limites de velocidade da via em áreas de congestionamento para manter um melhor fluxo do tráfego e reduzir o risco de colisões. O uso temporário do acostamento tem o objetivo de fornecer uma faixa adicional de rolamento para oferecer uma maior capacidade durante um congestionamento ou em períodos que as vias estão sobrecarregadas (Sisiopiku et al., 2009). O uso temporário do acostamento é geralmente implantado em conjunto com harmonização da velocidade. Usa-se harmonização da velocidade para reduzir as velocidades praticadas antes da liberação do uso do acostamento (Kuhn, 2008).

No Brasil, o uso de estratégias de gerenciamento ativo de tráfego não é empregado. Particularidades no comportamento do tráfego nas autoestradas brasileiras fazem do país um bom candidato a receber estas estratégias inovadoras. O comportamento não é homogêneo, e cada faixa de tráfego possui médias de velocidades, intensidades de fluxo e composições de tráfego diferentes. Portanto, o gerenciamento ativo de tráfego pode oferecer benefícios ao harmonizar as velocidades entre as faixas e assim retardar o aparecimento de colapso no fluxo, reduzir o número de ultrapassagens e o risco de colisões. Com o uso temporário do acostamento é possível oferecer uma capacidade adicional em períodos congestionados.

Este artigo tem como objetivo modelar estratégias de gerenciamento ativo de tráfego para uma autoestrada brasileira, a fim de avaliar e quantificar a eficácia destas estratégias. As estratégias de harmonização da velocidade e uso temporário do acostamento foram modeladas. A estratégia de harmonização da velocidade foi modelada para analisar os efeitos que as reduções dos limites de velocidade causam no trecho, em especial nos pontos onde ocorrem colapsos no fluxo de tráfego. A estratégia do uso do acostamento foi modelada para avaliar o impacto que uma faixa adicional de rolamento tem sobre o trecho. O software de micro simulação VISSIM foi utilizado para modelagem do trecho em estudo, que corresponde a um segmento da rodovia BR290, situada no estado do Rio Grande do Sul.

A seção 2 deste artigo apresenta uma caracterização do trecho em estudo, trazendo uma análise das condições operacionais da autoestrada em estudo. Na seção 3 é apresentado o

trecho modelado, e o algoritmo de controle do sistema de gerenciamento ativo de tráfego usado na modelagem. Na seção 4 é apresentada uma análise dos resultados de simulação e seus impactos no trecho modelado. Conclusões são apresentadas na seção 5.

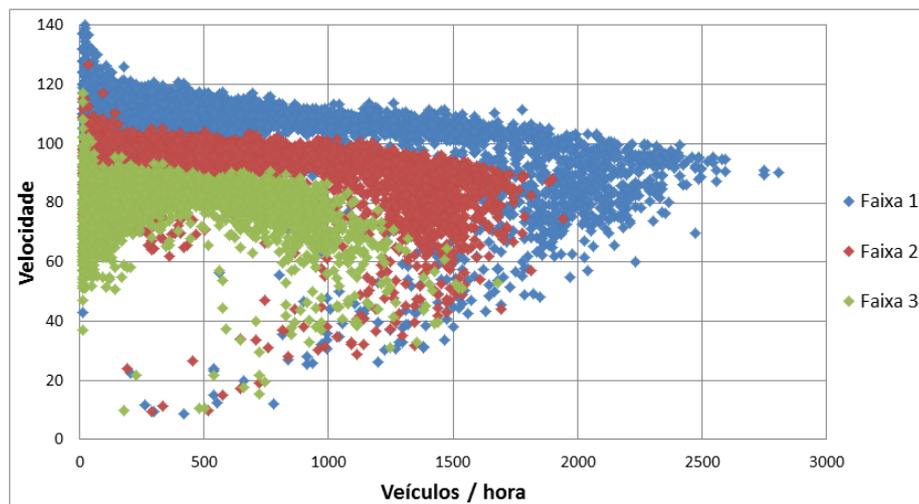
## 2. CARACTERIZAÇÃO DO TRECHO EM ESTUDO

Foi selecionado para modelagem um trecho da rodovia BR290, situada no estado do Rio Grande do Sul. O trecho em estudo possui 10 km de extensão, e uma rampa acesso no quarto km do trecho. Todo o trecho possui três faixas de rolamento, com exceção de um segmento de 600 metros localizado após a rampa de acesso, que possui quatro faixas. A rodovia possui faixas de rolamento com 3,75 metros cada. Os limites de velocidade para o trecho em estudo são de 110 km/h para veículos leves e 90 km/h para veículos pesados.

Uma análise das condições operacionais do trecho em estudo foi realizada a partir de um conjunto de dados coletados na autoestrada através de laços indutivos. Esta caracterização do trecho em estudo é importante para compreender o comportamento do tráfego e as condições da via em períodos críticos que precedem a ocorrência de colapsos no fluxo. São nestes períodos críticos que as estratégias de gerenciamento ativo de tráfego atuam.

### 2.1 Condições Operacionais do Trecho em Estudo

A rodovia recebe elevados fluxos no período do verão e em feriados importantes e, com isso, acontecem as maiores variabilidades de velocidades e intensidades de fluxo. Portanto, neste período as ocorrências de congestionamentos e colapsos no fluxo são maiores. A Figura 1 apresenta a relação fluxo x velocidade para uma coleta de dados feita no mês de Janeiro de 2013. A composição de dados está agrupada em intervalos de 5 minutos.



**Figura 1:** Relação fluxo x velocidade para observações do mês de Janeiro de 2013

Existe uma diferença significativa entre as velocidades e intensidades de fluxo das três faixas. A primeira faixa da esquerda – Faixa 1, apresenta as maiores velocidades e volumes, enquanto a faixa da direita – Faixa 3, apresenta as menores velocidades e volumes. Um ponto

importante é o fato de que a Faixa 3 recebe grande parte do tráfego de caminhões e ônibus, o que influencia na redução da intensidade de fluxo e das velocidades, uma vez que os limites de velocidade são diferentes para veículos leves e pesados. Nesta faixa também predominam o tráfego de veículos leves lentos que trafegam com velocidades muito inferiores às regulamentadas.

Como apontado por Caleffi et. al. (2012), o tráfego na rodovia BR290 não é homogêneo. Cada faixa de tráfego possui médias de velocidades, intensidades de fluxo e composições de tráfego diferentes. Assim, as estratégias de gerenciamento ativo de tráfego podem minorar o aparecimento de colapsos no fluxo nesta rodovia ao harmonizar as velocidades das faixas de tráfego, além de oferecer uma capacidade adicional com o uso temporário do acostamento.

### **3. MODELAGEM DO TRECHO EM ESTUDO**

A micro simulação é uma ferramenta capaz de reproduzir diversos cenários reais de tráfego, e é amplamente usada na elaboração de estudos e desenvolvimento de projetos em engenharia de transportes. Os modelos de simulação são especialmente úteis quando as estratégias em análise exigem novas construções ou investimentos onerosos, como é o caso do gerenciamento ativo de tráfego (Park e Qi, 2006).

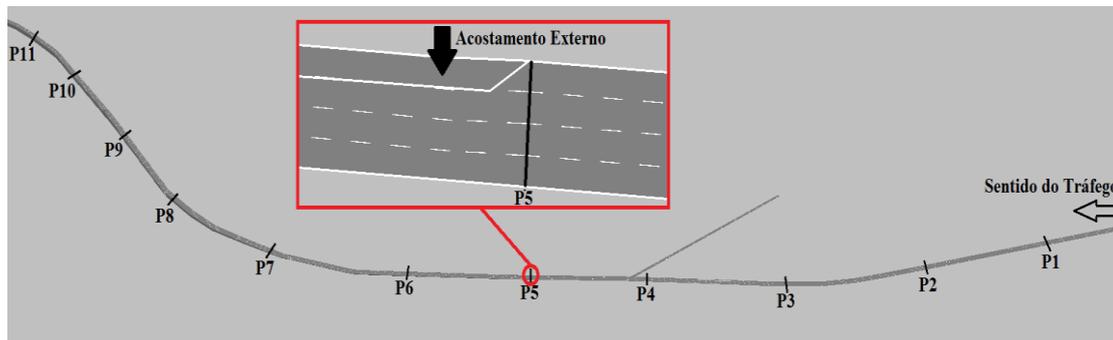
O software de micro simulação VISSIM foi utilizado para modelagem do trecho em estudo. O VISSIM fornece ferramentas e funcionalidades que possibilitam implementar estratégias de gerenciamento ativo de tráfego no modelo de simulação. Além disso, o VISSIM possui o *vehicle actuated programming* (VAP), que é uma ferramenta de programação que torna possível a implementação de estratégias de controle de tráfego em resposta as condições do trânsito em tempo real (PTV, 2010). Dados coletados através de laços indutivos na rodovia BR290 foram usados para calibrar e validar o modelo de simulação.

Foram feitos três conjuntos (A, B e C) de simulações – cada conjunto com seis replicações. As replicações foram feitas, pois o VISSIM é um modelo de simulação microscópico e estocástico. Na simulação A, o trecho foi modelado sem nenhuma estratégia de gerenciamento ativo de tráfego, a fim de representar o comportamento deste trecho em condições normais de tráfego. Na simulação B, foi modelada apenas a estratégia de harmonização da velocidade, usando limites de velocidade variável (L.V.V.). Na simulação C, foram modeladas a harmonização da velocidade e o uso temporário do acostamento. O modelo foi desenvolvido para representar 8 horas de simulação, correspondentes ao período de 14:00 a 22:00 horas.

#### **3.1 Layout do Trecho em Estudo**

Para a simulação da harmonização da velocidade e do uso temporário do acostamento, foram criados no modelo de simulação onze pórticos. Estes pórticos são responsáveis por: indicar aos veículos uma eventual mudança nos limites de velocidade e; indicar quando o acostamento está disponível para uso. Em cada um dos onze pórticos há também detectores responsáveis pela coleta de informações de velocidade, volume e ocupação da via. Os pórticos possuem um espaçamento de 800 metros, que é indicado por Federal Highway Administration (2011) como sendo o espaçamento médio em rodovias onde o gerenciamento ativo de tráfego foi implantado. O segmento que possui quatro faixas de tráfego acaba no ponto onde está

localizado o p3rtico 5. A Figura 2 apresenta o trecho em estudo modelado no software VISSIM, com os onze p3rticos. Estes p3rticos s3o chamados de P1 a P11, respectivamente.



**Figura 2:** Trecho em estudo

O segmento, do p3rtico 5 at3e o final do trecho, foi selecionado para receber a estrat3gia do uso tempor3rio do acostamento, uma vez que o tr3fego adicional do acesso e a redu33o do n3mero de faixas de quatro para tr3s faixas no p3rtico 5 caracterizam um gargalo na via – Figura 3.



**Figura 3:** Gargalo ativo

Um gargalo se torna ativo quando o fluxo que chega nele excede a capacidade a jusante. Nesta situa33o um congestionamento se forma no gargalo, e este congestionamento cresce 3 montante, tornando o fluxo de sa3da menor do que a capacidade nominal da via. Portanto, o fluxo de sa3da em um gargalo diminui mesmo com a demanda sendo suficiente para alimentar um fluxo maior (Chung et. al., 2007).

O segmento entre o acesso e o p3rtico 5, onde acontecem o aumento e posterior redu33o do n3mero de faixas, 3 o segmento mais cr3tico do trecho em estudo. Neste ponto do trecho a incid3ncia de congestionamentos 3 maior devido ao gargalo e o tr3fego adicional do acesso, e as m3dias de velocidade reduzem significativamente quando acontecem colapsos no fluxo do tr3fego.

### 3.2 Algoritmo de Controle do Gerenciamento Ativo de Tr3fego

O algoritmo de controle do gerenciamento ativo de tr3fego foi desenvolvido atrav3s da ferramenta *vehicle actuated programming* (VAP) do VISSIM. As estrat3gias de controle usadas para determinar os limites de velocidade vari3vel (L.V.V.) na opera33o da harmoniza33o da velocidade s3o fundamentais para o sucesso do funcionamento do sistema. Estas estrat3gias s3o aplicadas atrav3s de um algoritmo que determina indicadores e limites que acionam a harmoniza33o da velocidade e/ou uso tempor3rio do acostamento. Atrav3s das

informações provenientes de detectores é possível fazer o controle destas estratégias em tempo real, otimizando o processo (Nezamuddin et al., 2011).

O algoritmo de controle foi projetado para selecionar os limites de velocidade e o uso temporário do acostamento com base em medidas médias de volume, velocidade e ocupação da via durante um período de 2 minutos. Estes limites são selecionados através de informações provenientes dos detectores que estão posicionados em cada um dos onze pórticos. Este design incorpora o estado da prática dos primeiros sistemas de gerenciamento ativo de tráfego.

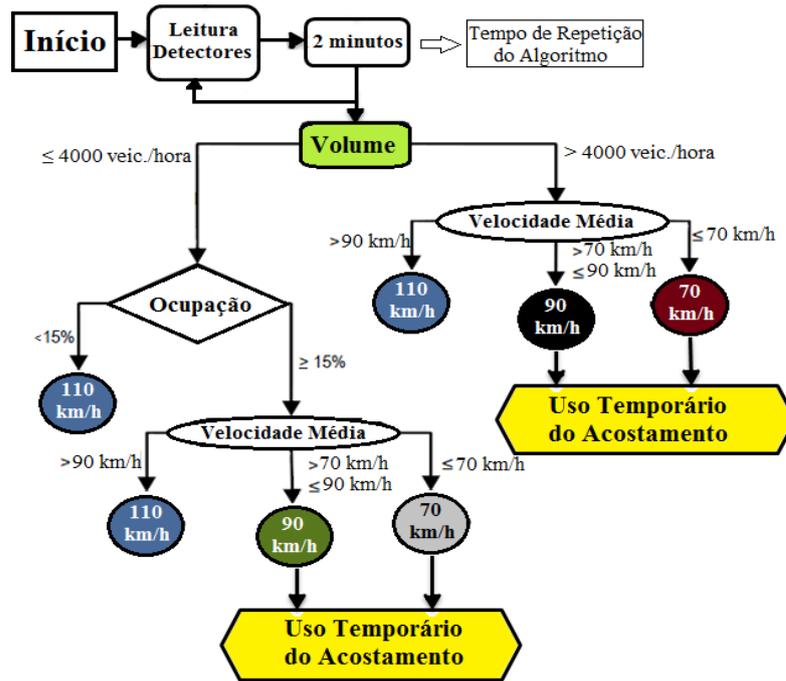
Nas autoestradas inglesas que possuem gerenciamento ativo de tráfego, os limites de velocidade são desencadeados por limiares de volume. Ao detectar um volume de 1650 veículos por hora por faixa, os limites de velocidade reduzem para 60 mi/h, quando o limite da via é de 70 mi/h. Quando o volume atinge 2050 veículos por hora por faixa, os limites de velocidade reduzem para 50 mi/h. Nas autoestradas holandesas, os limites de velocidade reduzem para 90 ou 70 km/h, com base em medidas médias de volume e velocidade durante 1 minuto (Allaby et al., 2007). Na Alemanha, o sistema altera os limites de velocidade baseados em relações pré-definidas de velocidade, fluxo e densidade. Os limites de velocidade variam de 120 a 60 km/h, com decréscimos de 20 km/h (Papageorgiou et. al., 2008).

Os valores dos parâmetros para o algoritmo de controle modelado foram selecionados com base em um estudo de caracterização das condições operacionais do trecho em períodos críticos que precedem a ocorrência de colapso no fluxo. Um limiar de volume de 4000 veículos por hora foi selecionado, pois este é o volume da via que precede a ocorrência de *breakdown*. Para a ocupação, foi selecionado um limiar de 15%, pois dados revelaram que este limite se aproxima do período de ocupação crítico em que ocorrem colapsos no fluxo. Foram usados três limites de velocidade na modelagem. A velocidade limite da via (110 km/h); a primeira redução de velocidade (90 km/h); e a segunda redução de velocidade (70 km/h).

Uma vez que o sistema de gerenciamento ativo de tráfego é ativado no pórtico onde há a detecção dos limiares do algoritmo de controle, as velocidades indicadas nos pórticos a montante são determinadas com base em uma *zona de atuação* e uma *zona de transição*, as quais são descritas a seguir:

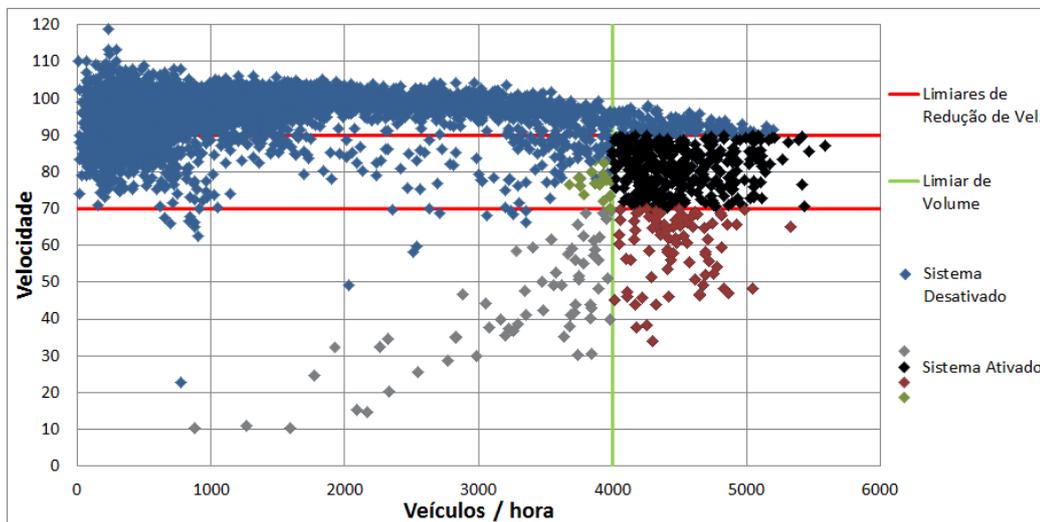
- *Zona de atuação* – Harmonização da velocidade e/ou uso temporário do acostamento são ativados no pórtico de detecção e nos dois pórticos mais próximos a montante. Os pórticos a montante exibem os mesmos limites de velocidade do pórtico de detecção;
- *Zona de transição* – Se o limite de velocidade ativado for reduzido de 110 para 70 km/h, o último pórtico da zona de atuação (segundo pórtico a montante) deve exibir o limite de velocidade de 90 km/h, para proporcionar uma transição gradual de redução de velocidade para os condutores.

O primeiro passo do algoritmo de controle é fazer a leitura dos detectores a cada dois minutos. As médias das leituras a cada dois minutos são então comparadas com os limiares de volume, ocupação e velocidades selecionados no estudo de caracterização do trecho, para então determinar se o sistema de gerenciamento ativo de tráfego entrará em operação. Após a ativação do gerenciamento ativo de tráfego, o sistema se encerra quando: o volume da via for menor que 4000 veic./hora e; a ocupação menor que 15%. A Figura 4 apresenta o fluxograma do algoritmo de controle usado na modelagem.



**Figura 4:** Fluxograma do algoritmo de controle

A Figura 5 apresenta a relação fluxo x velocidade da rodovia para a coleta de dados feita no mês de Janeiro de 2013, apontando o conjunto de dados onde o sistema de gerenciamento ativo de tráfego estaria ativado, de acordo com os limiares do algoritmo de controle.



**Figura 5:** Relação fluxo x velocidade da rodovia

As linhas vermelhas indicam os dois limiares de velocidade que ativam o sistema, e a linha verde indica o limiar de volume que ativa o sistema. Os pontos azuis indicam o estado da rodovia em que o sistema de gerenciamento ativo de tráfego estaria desativado, e operando com o limite de velocidade da via de 110 km/h. Os pontos pretos, marrons, verdes e cinzas indicam o estado da rodovia em que o sistema estaria ativado.

## 4. ANÁLISE DOS RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

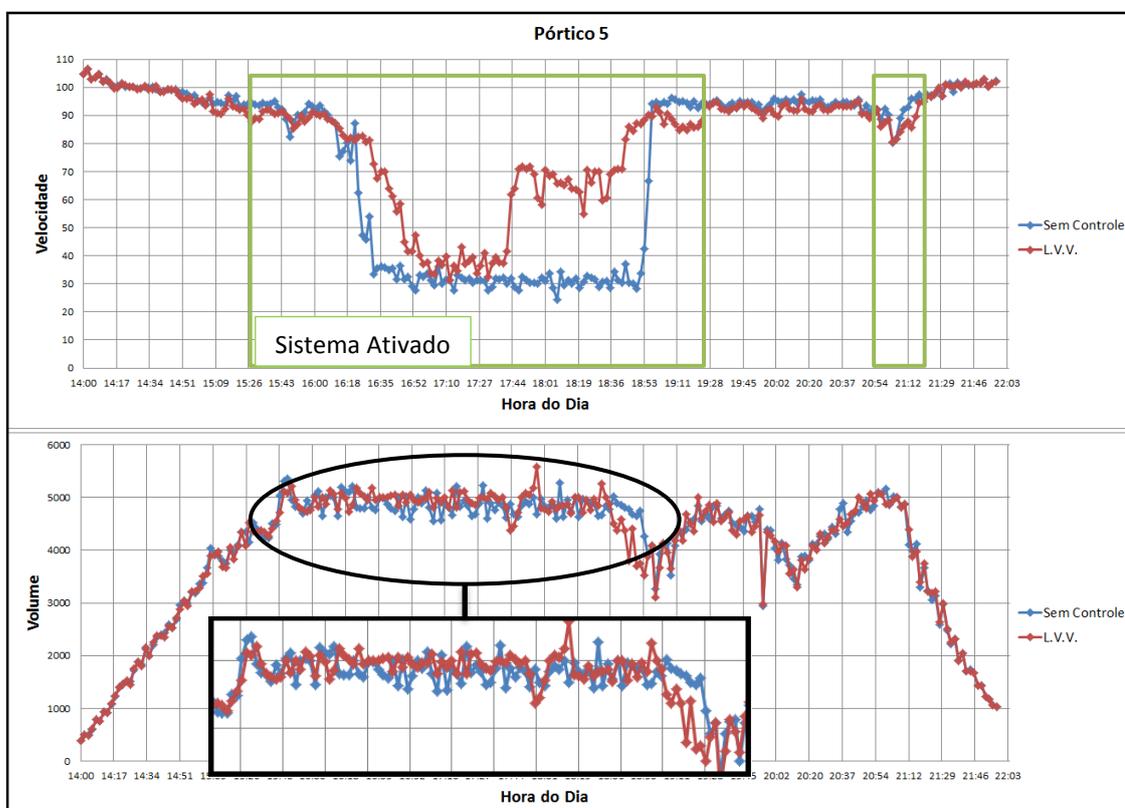
A análise dos resultados de simulação foca nos efeitos que as estratégias de gerenciamento ativo de tráfego têm sobre o trecho em estudo. Ao dividir a modelagem em três simulações (A – sem controle, B – com a estratégia de harmonização da velocidade e C – harmonização da velocidade e uso temporário do acostamento), é possível analisar separadamente os efeitos de apenas uma estratégia, e das estratégias implantadas em conjunto.

Os impactos da modelagem nas velocidades médias, no tempo de viagem e nas trocas de faixa foram analisados. Resultados destas análises apontam que o gerenciamento ativo de tráfego apresenta impactos positivos na operação do tráfego. Com as estratégias sendo implantadas em conjunto, estes impactos possuem uma maior relevância.

### 4.1 Impacto nas Velocidades Médias

No pórtico 5, é onde o trecho tem as menores médias de velocidades quando a via atinge sua capacidade. Neste ponto as velocidades caem devido à perturbação gerada pelo acesso e pela redução de quatro para três faixas. Portanto, é neste ponto que as estratégias de gerenciamento ativo de tráfego têm seu maior impacto no tráfego.

A Figura 6 apresenta os resultados das simulações A e B para o pórtico 5. Nesta Figura são apresentados: uma comparação das velocidades médias entre o modelo de simulação sem controle, e com o controle de harmonização da velocidade; e uma comparação entre os volumes dos modelos. Cada ponto corresponde à média dos veículos a cada 2 minutos.



**Figura 6:** Comparação das velocidades médias e volume das simulações A e B, para o pórtico 5

Pode-se notar na Figura 6 que quando os limites de velocidade variável (L.V.V.) passam a ser empregados, há um retardo no aparecimento de colapso no fluxo de tráfego. É possível notar também que com o uso de L.V.V., o período em que a via permanece em estado de *breakdown* é menor. Com o uso de L.V.V. é possível ter um maior controle quando o gargalo no pórtico 5 está ativo. Ao harmonizar as velocidades a montante deste gargalo, os *headways* entre os veículos, as trocas de faixa e as ultrapassagens diminuem, reduzindo a probabilidade de conflitos e de colapsos, fazendo o fluxo de tráfego fluir de uma forma mais controlada.

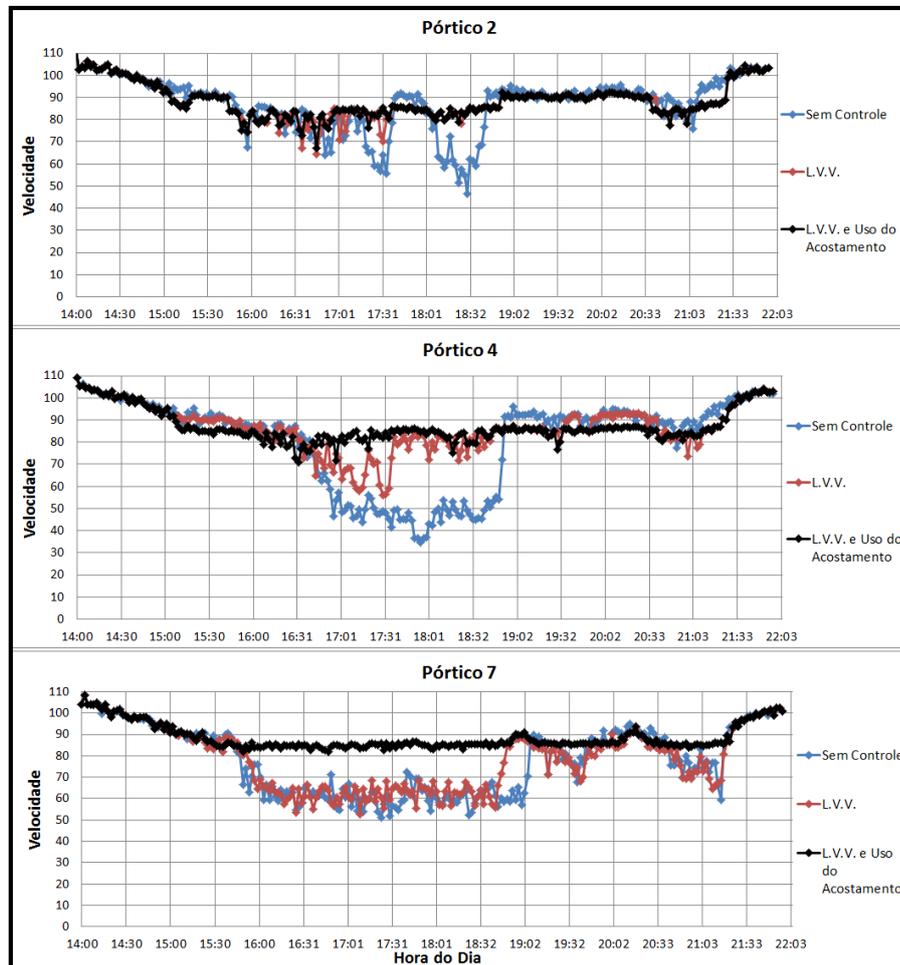
Usando a estratégia de harmonização da velocidade, é possível apenas reduzir os efeitos de *breakdown* no fluxo de tráfego, como vistos na Figura 6. Porém, ao acrescentar a estratégia do uso temporário do acostamento (simulação C) neste sistema de gerenciamento ativo de tráfego, os colapsos no fluxo são completamente eliminados, como se pode notar na Figura 7.



**Figura 7:** Comparação das velocidades médias e volume das simulações A e C, para o pórtico 5

O uso temporário do acostamento permite fornecer o uso de uma faixa adicional de rolamento em períodos congestionados, fazendo com que não haja mais um ponto de redução no número de faixas no pórtico 5. Ao eliminar o gargalo neste ponto, as médias de velocidade se mantêm elevadas, mesmo nos períodos em que a via opera na sua capacidade. Para que se tenham efeitos positivos no ponto onde há colapsos no fluxo, o sistema deve ser ativado a montante, pois assim é possível harmonizar o comportamento do tráfego antes do ponto de início do *breakdown*. Assim é possível ter um fluxo mais regular e com menos conflitos ao se aproximar do ponto de *breakdown*. Quando a rodovia está operando na sua capacidade, é possível notar que com o uso das estratégias de gerenciamento ativo de tráfego o volume da via tem uma menor oscilação, se mantendo em níveis mais elevados.

A Figura 8 apresenta a comparação das velocidades para os pórticos 2 e 4, que estão localizados antes do acesso, e para o pórtico 7, localizado depois do acesso, e onde o uso temporário do acostamento é empregado.



**Figura 8:** Comparação das velocidades para os pórticos 2, 4 e 7

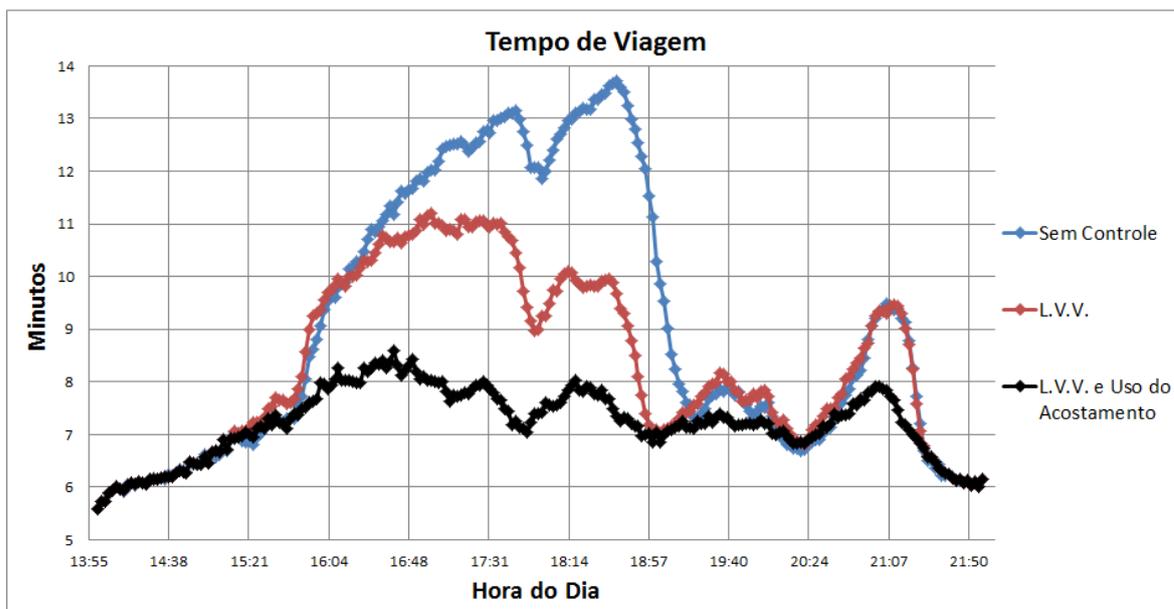
O uso temporário do acostamento é utilizado a partir do pórtico 5. Portanto, os impactos positivos do sistema nos pórticos anteriores ao acesso se deve principalmente a estratégia de harmonização da velocidade. Quanto mais próximo da região de conflito onde acontecem os colapsos no fluxo, maiores são os impactos do sistema. No pórtico 4, posicionado logo antes do acesso, também é possível notar os efeitos do gargalo ativo, e os efeitos positivos que o sistema tem nos períodos de colapso. Ao harmonizar as velocidades a montante e não só no ponto onde foi detectado colapso, o sistema pode minimizar as ondas de choque que se propagam a montante e evitar que ocorram colapsos em outros pontos da via.

#### 4.2 Impacto nos Tempos de Viagem

Um dos benefícios dos sistemas de gerenciamento ativo de tráfego, apontados por Sisiopiku et. Al. (2009) e Federal Highway Administration (2007), é o aumento da confiabilidade no tempo de viagem. Como apontam Fontaine e Miller (2012), diversas rodovias com

implantação do gerenciamento ativo de tráfego tiveram redução nos tempos de viagem, bem como uma redução na variabilidade destes tempos de viagem.

Os impactos dos tempos de viagem modelados foram medidos comparando, a cada 2 minutos, as médias dos tempos de viagem dos veículos que percorreram todo o trecho, que possui 10 km de extensão. A Figura 9 apresenta uma comparação dos tempos de viagem para as simulações A, B e C, que representam o modelo sem nenhum controle – simulação A; com controle de harmonização da velocidade (L.V.V.) – simulação B e; com L.V.V. e uso temporário do acostamento – simulação C.



**Figura 9:** Comparação dos tempos de viagem

Pode-se notar uma significativa redução nos tempos de viagem quando as estratégias de gerenciamento ativo de tráfego são empregadas. No período entre 16:00 e 20:00 horas, período este em que a rodovia estava operando na sua capacidade, é possível perceber a maior diferença entre os tempos de viagem para as três simulações.

No período das 21:00 horas, o volume da rodovia chega a sua capacidade, porém por um curto intervalo de tempo. Quando a rodovia opera na sua capacidade por um período de tempo pequeno, as velocidades não sofrem uma grande variação, e não há o aparecimento de colapsos no fluxo de tráfego. Em consequência, os tempos de viagem do sistema com apenas L.V.V. permanecem os mesmos do modelo sem nenhum controle. A harmonização da velocidade só tem impacto nos tempos de viagem quando ocorrem colapsos no fluxo.

Usando as duas estratégias – L.V.V. e uso do acostamento, nota-se uma grande redução na variabilidade do tempo de viagem, o que representa um tempo de viagem mais confiável. A Tabela 1 apresenta, para o período entre 16:00 e 20:00 horas, uma comparação entre: os picos máximos e mínimos; a variabilidade nos tempos de viagem e; o tempo médio de viagem.

**Tabela 1:** Comparações do tempo de viagem para a rodovia operando na capacidade

<b>16:00 a 20:00 horas</b>			
<b>Tempo de Viagem</b>	<b>Sem Controle (min)</b>	<b>L.V.V. (min)</b>	<b>L.V.V. e Uso do Acostamento (min)</b>
<b>Pico Máximo</b>	13:43	11:11	08:35
<b>Pico Mínimo</b>	07:17	07:01	06:51
<b>Variabilidade</b>	06:26	04:10	01:44
<b>Tempo Médio</b>	11:51	09:49	07:40

Com a rodovia operando com a estratégia de L.V.V., o tempo médio de viagem reduz 17,05%, e a variabilidade do tempo de viagem reduz 35,25%. Já com a rodovia operando com as duas estratégias – L.V.V. e uso do acostamento, o tempo médio de viagem reduz 35,19%, e a variabilidade do tempo de viagem reduz 73,03%.

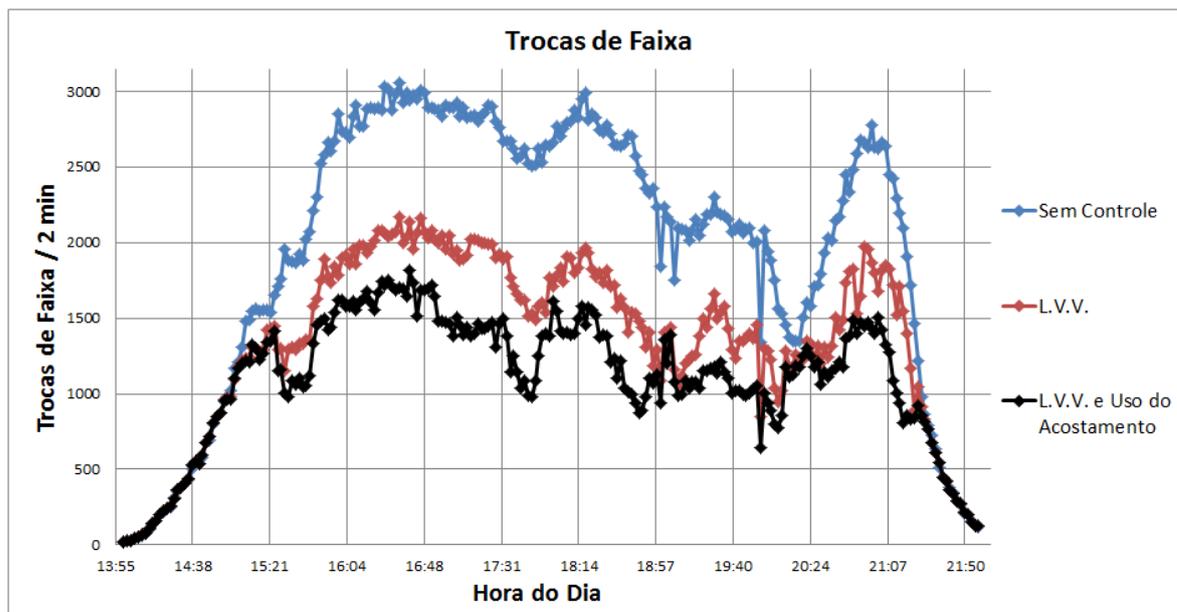
Estes resultados apontam que o gerenciamento ativo de tráfego tem um grande e positivo impacto nos tempos de viagem do trecho modelado, reduzindo significativamente o pico máximo, a variabilidade e o tempo médio das viagens.

#### **4.3 Impacto nas Trocas de Faixa**

Outro benefício dos sistemas de gerenciamento ativo de tráfego é o aumento da segurança no tráfego. Uma das formas de mensurar o aumento da segurança é através da avaliação do número de trocas de faixa que acontecem durante uma viagem. Ao utilizar a estratégia de harmonização da velocidade, as trocas de faixa diminuem, pois uma vez que os veículos trafegam com uma menor variabilidade de velocidades, acontecem menos ultrapassagens e consequentemente menos trocas de faixa. Ao reduzir o número de trocas de faixa, a probabilidade de ocorrer incidentes também reduz (Federal Highway Administration, 2007).

Nas autoestradas brasileiras os condutores são mais agressivos, e o número de trocas de faixa é maior. Com isso, o simulador foi calibrado para que as trocas de faixa no modelo representem a realidade brasileira, e garantam que as trocas contabilizadas na modelagem coincidem com a realidade.

Os impactos das trocas de faixa foram medidos comparando, a cada 2 minutos, o número de trocas de faixa que ocorreram durante os 10 km do trecho modelado. A Figura 10 apresenta uma comparação das trocas de faixa para as simulações modeladas. Com o uso da estratégia de L.V.V., o número de trocas de faixa reduziu 30,69%. Já com as estratégias de L.V.V. e uso do acostamento, o número de trocas de faixa reduziu 43,78%.



**Figura 10:** Comparação das trocas de faixa

Mesmo com uma faixa de rolamento adicional com o uso temporário do acostamento o número de trocas de faixa é menor. Isto se deve ao fato de que usando as duas estratégias em conjunto, o colapso no tráfego que acontece nas mediações do pórtico 5 é eliminado, como mostra a Figura 7. Eliminando os efeitos deste colapso, os veículos trafegam livremente neste trecho, evitando os conflitos que poderiam levar os veículos a trocarem de faixa devido às reduções de velocidade.

## 5. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou a modelagem de estratégias de gerenciamento ativo de tráfego para um trecho de uma autoestrada brasileira. As estratégias modeladas foram a de harmonização da velocidade e a de uso temporário do acostamento. A modelagem demonstrou que o gerenciamento ativo de tráfego tem impactos positivos na operação do tráfego.

O uso do sistema de gerenciamento ativo de tráfego reduziu os tempos médios das viagens e a variabilidade dos tempos destas viagens, e reduziu as trocas de faixa, o que implica em uma redução dos conflitos e da probabilidade de ocorrer incidentes. Com o uso do sistema houve também redução do tempo em que o fluxo da via permanece em colapso, aumentando a eficiência do trecho.

A modelagem indicou os seguintes resultados para a estratégia de harmonização da velocidade, que utiliza o uso de limites de velocidade variável (L.V.V.):

- Redução visual dos *headways*;
- Redução de 17,05% no tempo médio das viagens;
- Redução de 32,25% na variabilidade do tempo de viagem;
- Aumento da segurança com a redução de 30,69% nas trocas de faixa.

O uso conjunto das estratégias de gerenciamento ativo de tráfego leva a um melhor aperfeiçoamento das condições operacionais da via. Para este uso conjunto de harmonização da velocidade e uso temporário do acostamento a modelagem indicou os seguintes resultados:

- Redução visual dos *headways*;
- Redução de 35,19% no tempo médio das viagens;
- Redução de 73,03% na variabilidade do tempo de viagem;
- Aumento da segurança com a redução de 43,78% nas trocas de faixa.

O sucesso das estratégias de gerenciamento ativo de tráfego depende principalmente da compreensão e do comportamento dos usuários quanto aos métodos de aplicação destas estratégias. No universo de modelagem, o comportamento dos veículos é pré-determinado pelo simulador de tráfego, e muitas vezes pode não representar a variabilidade de comportamento apresentada pelos usuários num cenário real de tráfego. O mesmo pode ser afirmado quanto à compreensão das estratégias de controle empregadas no simulador.

Com isso, numa implantação do gerenciamento ativo de tráfego em rodovias, deve-se levar em consideração questões como a compreensão dos usuários perante novas estratégias de controle. Através de uma boa compreensão por parte dos usuários é possível minimizar a variabilidade de comportamento ao implantar estratégias inovadoras.

#### **Agradecimentos**

Os autores agradecem o apoio da concessionária CONCEPA e da ANTT, que disponibilizaram os dados de tráfego, e agradece o apoio financeiro do CNPq, através de uma bolsa de mestrado.

#### **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- Allaby, P., B. Hellinga e M. Bullock (2007) *Variable Speed Limits: Safety and Operational Impacts of a Candidate Control Strategy for Freeway Applications*. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems 8, No. 4, pp. 671-680.
- Caleffi, F., et. al. (2012) *Simulação de Alternativas Operacionais de Um Segmento Especial de Autoestrada Através do Software VISSIM*. XXVI ANPET - Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, v. 1, p. 36-47, Brasil.
- Carlson, R. C., et al. (2010) *Optimal motorway traffic flow control involving variable speed limits and ramp metering*. Transportation Science, Vol. 44, pp. 238-253, Estados Unidos.
- Chung, K.; J. Rudjanakanoknad, e M. Cassidy (2007) *Relation Between Traffic Density and Capacity Drop at Three Freeway Bottlenecks*. Transportation Research Part B: Methodological, v. 41, n. 1, p. 82-95, Estados Unidos.
- Federal Highway Administration (2007) *Active Traffic Management: The Next Step in Congestion Management*. Alexandria, VA: American Trade Initiatives. FHWA-PL-07-012, Estados Unidos.
- Federal Highway Administration (2011) *Freeway Geometric Design for Active Traffic Management in Europe*. Alexandria, VA: American Trade Initiatives. Report FHWA-PL-11-004, Estados Unidos.
- Fontaine, M. D. e J. S. Miller (2012) *Planning for Active Traffic Management in Virginia: International Best Practices and Implementation Strategies*. Virginia Center for Transportation Innovation and research, Final Report VCTIR 13-R1, Estados Unidos.

- Geistefeldt, Justin (2012) *Operational Experience With Temporary Hard Shoulder Running in Germany*. Transportation Research Board Annual Meeting, Paper 12-3090, Washington D.C., Estados Unidos.
- Grant, David (2007) *Case Study: M42 Active Traffic Management*. Highways Agency, Inglaterra.
- Kuhn, B. (2008) *Smart Traffic 2008: Active Congestion Management – Infrastructure and Operations, Session 3: Active Traffic Management*. 5<sup>th</sup> Conference in The Series, Brisbane, Australia.
- Lin, O. W.; K. P. Kang e G. L. Chang (2004) *Exploring the Effectiveness of Variable Speed Limit Controls on Highway Work-Zone Operations*. IEEE Intelligent Transportation Systems, VOL 8, p. 1–14, Estados Unidos.
- Middelham, Frans (2006) *Dynamic Traffic Management*. Overview by Handbook: Sustainable Traffic Management. Rijkswaterstaat - AVV Transport Research Centre, Holanda.
- Nezamuddin, N., et al. (2011) *Traffic Operations and Safety Benefits of Active Traffic Strategies on TxDOT Freeways*. Federal Highways Administration, Publication Number: FHWA/TX-12/0-6576-1, Estados Unidos.
- Papageorgiou, M., Kosmatopoulos, E., and Pasmichail, I. (2008) *Effects of Variable Speed Limits on Motorway Traffic Flow*. In Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2047, pp. 47-48, Washington, DC, Estados Unidos.
- Park, B. e H. Qi (2006) *Microscopic Simulation Model Calibration and Validation for Freeway Work Zone Network – A Case Study of Vissim*. IEEE Intelligent Transportation Systems Conference, Toronto, Canada.
- PTV (2010) *Vissim User Manual – V.5.30*. Karlsruhe, Alemanha.
- Sisiopiku, P. V.; A. Sullivan e G. Fadel (2009) *Implementing Active Traffic Management Strategies in the U.S.*. University Transportation Center for Alabama, Birmingham, Alabama, Estados Unidos.
- Vadde, R., et. al. (2012) *A Simulation Study of Using Active Traffic Management Strategies on Congested Freeways*. Journal of Modern Transportation, Vol. 20, n. 3, p. 178-184, Estados Unidos.

## 5. CONCLUSÕES

Esta dissertação teve como objetivo apresentar uma análise da modelagem de estratégias de gerenciamento ativo de tráfego para um estudo de caso de uma autoestrada brasileira. Este capítulo apresenta as principais conclusões deste estudo e recomendações para trabalhos futuros.

### 5.1 PRINCIPAIS CONCLUSÕES

Esta dissertação apresentou uma descrição das tendências atuais do gerenciamento ativo de tráfego, discutindo seus propósitos, definições, benefícios e tendências em novos projetos. Apresentou também o esforço de calibração do modelo de simulação, e uma análise para o trecho em estudo. Por fim, foi apresentada a modelagem de estratégias de gerenciamento ativo de tráfego para o trecho em estudo, a fim de avaliar e quantificar a eficácia destas estratégias.

A revisão bibliográfica das tendências atuais do gerenciamento ativo de tráfego apresentou as estratégias usadas na Europa e Estados Unidos. Estas estratégias são utilizadas para melhorar a segurança, diminuir o congestionamento, diminuir a variabilidade das velocidades, aumentar a capacidade e melhorar a confiabilidade das viagens nas autoestradas. Para que o gerenciamento ativo de tráfego tenha sua plena aplicação, é preciso ter uma infraestrutura que suporte as estratégias, e que possua a tecnologia e os equipamentos necessários para sua operação. Além disso, uma combinação de todas as estratégias operacionais pode maximizar os efeitos na rede de transporte.

A modelagem de simulação realizada no capítulo 2 fornece orientação quanto aos parâmetros de calibração que precisam ser modificados, e o método usado para calibrar e validar estes parâmetros, a fim de obter uma modelagem que possa representar de forma fiel ambientes rodoviários com as características deste trecho em estudo.

Os fatores mais importantes para o bom desempenho do modelo foram a calibração dos parâmetros de trocas de faixa e de *car following*, e a calibração das distribuições de velocidade desejadas. Para cenários com baixas e médias intensidades de fluxo os parâmetros de calibração demonstraram pouca influência na modelagem, pois nestas condições, os

veículos trafegam na maior parte do tempo com bastante liberdade, permitindo aos condutores imprimir velocidades próximas da desejada. Para altos volumes, os parâmetros de calibração possuem influência significativa na modelagem, principalmente na capacidade e na representação das trocas de faixa.

A validação da calibração do estudo de caso foi conduzida através de comparações dos dados coletados em campo com os dados provenientes do modelo de simulação. Através desta validação, é possível concluir que os cenários de simulação demonstraram bom comportamento, representando de forma satisfatória o trecho em estudo.

Após o processo de calibração e validação do modelo de simulação, foram simuladas estratégias de gerenciamento ativo de tráfego. As estratégias modeladas foram a de harmonização da velocidade e a de uso temporário do acostamento. A modelagem demonstrou que o gerenciamento ativo de tráfego tem impactos positivos na operação do tráfego, aumentando a eficácia do trecho em estudo.

A modelagem indicou os seguintes resultados para a estratégia de harmonização da velocidade, que utiliza o uso de limites de velocidade variável (L.V.V.): redução visual dos *headways*; redução de 17,05% no tempo médio das viagens; redução de 32,25% na variabilidade do tempo de viagem; e aumento da segurança com a redução de 30,69% nas trocas de faixa.

O uso conjunto das estratégias de gerenciamento ativo de tráfego leva a um melhor aperfeiçoamento das condições operacionais da via. Para este uso conjunto de harmonização da velocidade e uso temporário do acostamento a modelagem indicou os seguintes resultados: redução visual dos *headways*; redução de 35,19% no tempo médio das viagens; redução de 73,03% na variabilidade do tempo de viagem; e aumento da segurança com a redução de 43,78% nas trocas de faixa.

O sucesso das estratégias de gerenciamento ativo de tráfego depende principalmente da compreensão e do comportamento dos usuários quanto aos métodos de aplicação destas estratégias. No universo de modelagem, o comportamento dos veículos é pré-determinado pelo simulador de tráfego, e muitas vezes pode não representar a variabilidade de comportamento apresentada pelos usuários num cenário real de tráfego. O mesmo pode ser afirmado quanto à compreensão das estratégias de controle empregadas no simulador.

Com isso, numa implantação do gerenciamento ativo de tráfego em rodovias, deve-se levar em consideração questões como a compreensão dos usuários perante novas estratégias de controle. Através de uma boa compreensão por parte dos usuários é possível minimizar a variabilidade de comportamento ao implantar estratégias inovadoras.

## **5.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Nesta dissertação, foi usado no modelo de simulação apenas um modelo de algoritmo para implementação do sistema de gerenciamento ativo de tráfego. Trabalhos futuros poderiam reproduzir diferentes configurações de algoritmos, a fim de aperfeiçoar e enriquecer o modelo. Diferentes testes na modelagem podem ser feitos para estender a análise dos impactos do uso do sistema.

A análise dos períodos em que acontecem *breakdowns* pode ser aprofundada, analisando detalhadamente os pontos onde há *breakdown*, para caracterizar estes períodos e traçar um perfil mais detalhado da rodovia em estudo.

Esta dissertação utilizou o software de simulação de tráfego VISSIM 5.30. Outros softwares, como o Aimsun e Paramics apresentam modelos capazes de simular o gerenciamento ativo de tráfego. Os modelos de outros softwares poderiam ser igualmente avaliados em trabalhos futuros.

Por fim, recomenda-se que o sistema de gerenciamento ativo de tráfego seja implementado num trecho maior de rodovia, com um número maior de acessos e de pontos que caracterizam gargalos na via. Avaliando o sistema em um trecho maior, é possível fazer uma análise mais contundente dos resultados e avaliar melhor os impactos causados pelo sistema ativado.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allaby, P., B. Hellings e M. Bullock (2007) *Variable Speed Limits: Safety and Operational Impacts of a Candidate Control Strategy for Freeway Applications*. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems 8, No. 4, pp. 671-680.
- Caleffi, F., et al. (2012) *Simulação de Alternativas Operacionais de Um Segmento Especial de Autoestrada Através do Software VISSIM*. XXVI ANPET - Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, v. 1, p. 36-47, Brasil.
- Carlson, R. C., et al. (2010) *Optimal motorway traffic flow control involving variable speed limits and ramp metering*. Transportation Science, Vol. 44, pp. 238-253, Estados Unidos.
- Chang, G. L.; S. Y. Park e J. Paracha (2011) *ITS Field Demonstration: Integration of Variable Speed Limit Control and Travel Time Estimation for a Recurrently Congested Highway*. CD 90<sup>th</sup> Transportation Research Board Annual Meeting, Paper 11-1206, Washington D.C., Estados Unidos.
- Chung, K.; J. Rudjanakanoknad, e M. Cassidy (2007) *Relation Between Traffic Density and Capacity Drop at Three Freeway Bottlenecks*. Transportation Research Part B: Methodological, v. 41, n. 1, p. 82-95, Estados Unidos.
- Federal Highway Administration (2005) *Managed Lanes Handbook*. Texas Transportation Institute, Report 0-4160-24, Estados Unidos.
- Federal Highway Administration (2007) *Active Traffic Management: The Next Step in Congestion Management*. Alexandria, VA: American Trade Initiatives. FHWA-PL-07-012, Estados Unidos.
- Federal Highway Administration (2011a) *Freeway Geometric Design for Active Traffic Management in Europe*. Alexandria, VA: American Trade Initiatives. Report FHWA-PL-11-004, Estados Unidos.
- Federal Highway Administration (2011b) *Integrated Active Traffic and Travel Demand Management: A Holistic Approach to Congestion Management*. Alexandria, VA: American Trade Initiatives. FHWA-PL-11-011, Estados Unidos.
- Fellendorf, M. e P. Vortisch (2001) *Validation of the Microscopic Traffic Flow Model Vissim in Different Real-World Situations*. 80<sup>th</sup> Annual Meeting, Transportation Research Board, Washington, D.C., Estados Unidos.
- Ferreira, W. M. (2009) *Avaliação do Tratamento Dado ao Conteúdo Análise Combinatória em Livros Didáticos para o Ensino Médio*. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Católica de Brasília. Brasil.

- Fontaine, M. D. e J. S. Miller (2012) *Planning for Active Traffic Management in Virginia: International Best Practices and Implementation Strategies*. Virginia Center for Transportation Innovation and Research, Final Report VCTIR 13-R1, Estados Unidos.
- Geistefeldt, Justin (2011) *Capacity Effects of Variable Speed Limits on German Freeways*. Transportation Research Board, 6th International Symposium on Highway Capacity and Quality of Service pág. 48-56, Estados Unidos.
- Geistefeldt, Justin (2012) *Operational Experience With Temporary Hard Shoulder Running in Germany*. Transportation Research Board Annual Meeting, Paper 12-3090, Washington D.C., Estados Unidos.
- Gettman, D. e L. Head (2003) *Surrogate Safety Measures From Traffic Simulation Models*. Federal Highways Administration, Publication Number: FHWA-RD-03-050, Estados Unidos.
- Gomes, G., May, A. e Horowitz, R. (2004) A Microsimulation Model of a Congested Freeway using Vissim. *Transportation Research Record 1876, TRB, National Research Council*, Washington D.C., pp.71-81, Estados Unidos.
- Grant, David (2007) *Case Study: M42 Active Traffic Management*. Highways Agency, Inglaterra.
- Highways Agency (2007) *Ramp Metering Summary Report*. Highways Agency Publications, Inglaterra.
- Jacobsen, L. e T. Farradyne (2008) *Active Traffic Management: Efforts in the Seattle Area*. ITS Washington Panel Session. Washington State Department of Transportation, Estados Unidos.
- Kaveshgar, N.; N. Huynh e Y. Xie (2010) *A Decentralized Multi-Agent Systems Approach to Ramp Metering*. CD 90<sup>th</sup> Transportation Research Board Annual Meeting, Paper 11-3859, Washington D.C., Estados Unidos.
- Kuhn, B. (2008) *Smart Traffic 2008: Active Congestion Management – Infrastructure and Operations, Session 3: Active Traffic Management*. 5<sup>th</sup> Conference in The Series, Brisbane, Australia.
- Lee, C. e M. Abdel-Aty (2008) *Testing Effects of Warning Messages and Variable Speed Limits on Driver Behavior Using Driving Simulator*. Journal of the Transportation Research Board, N° 2069, Transportation Research Board, Washington D.C., pp. 55–64, Estados Unidos.
- Lin, O. W.; K. P. Kang e G. L. Chang (2004) *Exploring the Effectiveness of Variable Speed Limit Controls on Highway Work-Zone Operations*. IEEE Intelligent Transportation Systems, VOL 8, pp. 1–14, Estados Unidos.

- Lownes, N. e Machemehl R. (2006) Sensitivity of Simulated Capacity to Vissim Driver Behavior Parameter Modification. *Proceedings of the 85th Annual Meeting, TRB*, Washington D.C., Estados Unidos.
- Manneni, S., Sun, C. e P. Vortisch (2008) An Integrated Microscopic and Macroscopic Calibration for Psycho-Physical Car Following Models. *Proceedings of the 88th Annual Meeting, TRB*, Washington D.C., Estados Unidos.
- Middelham, Frans (2006) *Dynamic Traffic Management*. Overview by Handbook: Sustainable Traffic Management. Rijkswaterstaat - AVV Transport Research Centre, Holanda.
- Nezamuddin, N., et al. (2011) *Traffic Operations and Safety Benefits of Active Traffic Strategies on TxDOT Freeways*. Federal Highways Administration, Publication Number: FHWA/TX-12/0-6576-1, Estados Unidos.
- Oliveira, M. L. e H. B. B. Cybis (2008) Revisão da Experiência de Calibração do Software Vissim Aplicado a um Estudo de Caso de Autoestrada Brasileira. *VIII Seprosul – Semana de Engenharia de Produção Sul-Americana*, Bento Gonçalves, Brasil.
- Papageorgiou, M., Kosmatopoulos, E., and Pappmichail, I. (2008) *Effects of Variable Speed Limits on Motorway Traffic Flow*. In *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2047, pp. 47-48, Washington, DC, Estados Unidos.
- Park, B e J. D. Schneeberger (2003) Microscopic Simulation Model Calibration and Validation – Case Study of VISSIM Simulation Model for a Coordinated Actuated Signal System. *Transportation Research Record*, Paper No. 03-2531, Estados Unidos.
- Park, B. e H. Qi (2006) Microscopic Simulation Model Calibration and Validation for Freeway Work Zone Network – A Case Study of Vissim. *IEEE Intelligent Transportation Systems Conference*, Toronto, Canada.
- PTV (2010) *Vissim User Manual – V.5.30*. Karlsruhe, Alemanha.
- Sisiopiku, P. V.; A. Sullivan e G. Fadel (2009) *Implementing Active Traffic Management Strategies in the U.S.*. University Transportation Center for Alabama, Birmingham, Alabama, Estados Unidos.
- Sparmann, Jurg. M. (2007) *Active Traffic Management: Experiences made in Hessen*. Workshop on Active Traffic Management. Seattle, Estados Unidos.
- Stewart, P. (2003) *Ramp Metering Study*. SIAS Limited Final Report TPRAMP2/55129, Dundee, Inglaterra.
- Texas Department of Transportation (2002) *LBJ Managed Lanes: Traffic and Revenue Study*. Texas, TX, Estados Unidos.

- Ungemah, D. e B. Kuhn (2009) *Special Use of Shoulders for managed lanes*. Texas Transportation Institute, Texas, Estados Unidos.
- Vadde, R., et. al. (2012) *A Simulation Study of Using Active Traffic Management Strategies on Congested Freeways*. Journal of Modern Transportation, Vol. 20, n. 3, p. 178-184, Estados Unidos.
- Vallati, M. (2010) *Slip Ramp Spacing Design for Truck Only Lanes Using Microscopic Simulation*. Missouri University of Science and Technology, Tese de Mestrado, Estados Unidos.
- Washington State Department of Transportation (2007). *Active Traffic Management (ATM) Feasibility Study*. Washington D.C., Estados Unidos.
- Wiedemann R. e U. Reiter (1991) *Microscopic Traffic Simulation: The Simulation System Mission*. PTV America Library, Acesso em 08/06/2012, disponível em:  
<[http://www.ptvamerica.com/fileadmin/files\\_ptvamerica.com/library/1970s%20Wiedemann%20VISSIM%20car%20following.pdf](http://www.ptvamerica.com/fileadmin/files_ptvamerica.com/library/1970s%20Wiedemann%20VISSIM%20car%20following.pdf)>
- Wiedemann, R. (1974) *Simulation des Straßenverkehrsflusses*. Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen der Universität Karlsruhe, Heft 8, Alemanha.
- Woody, T. (2006) *Calibration Freeway Simulation Models in Vissim*. Final Research Report, University of Washington, Seattle, Estados Unidos.