

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

Deise Elise Guerra Favero

**RODOVIA BR/290/RS (FREE WAY): ANÁLISE DE
DESEMPENHO DO TRÁFEGO SOB INFLUÊNCIA DE
FENÔMENOS METEOROLÓGICOS**

Porto Alegre
novembro 2015

DEISE ELISE GUERRA FAVERO

**RODOVIA BR/290/RS (*FREE WAY*): ANÁLISE DE
DESEMPENHO DO TRÁFEGO SOB INFLUÊNCIA DE
FENÔMENOS METEOROLÓGICOS**

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

Orientadora: Helena Beatriz Bettella Cybis

Porto Alegre
novembro 2015

DEISE ELISE GUERRA FAVERO

**RODOVIA BR/290/RS (*FREE WAY*): ANÁLISE DE
DESEMPENHO DO TRÁFEGO SOB INFLUÊNCIA DE
FENÔMENOS METEOROLÓGICOS**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRA CIVIL e aprovado em sua forma final pela Professora Orientadora e pelo Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, novembro de 2015

Prof.^a Helena Beatriz Bettella Cybis
Dra. pela University of Leeds
Orientadora

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Helena Beatriz Bettella Cybis (UFRGS)
Dra. pela University of Leeds

Felipe Caleffi (UFRGS)
MSc. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Keli Mallmann (Concepa)
Especialista em Gestão de Obras, Tecnologia e Qualidade da Construção pelo IPOG

Dedico este trabalho a meus pais, Maria Cristina e Irineu,
que sempre me apoiaram de forma incondicional, e
fizeram dos meus sonhos, também os seus.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à professora Helena Beatriz Bettella Cybis, orientadora deste trabalho, pelo empenho e dedicação. Por compartilhar ideias, experiência e sabedoria, e pelo papel fundamental na construção da minha bagagem de conhecimento.

Agradeço à professora Carin Maria Schmitt pela dedicação exemplar aos alunos e por toda a paciência, disponibilidade e palavras de incentivo ao longo de todo o trabalho.

Agradeço à Shanna Trichês Lucchesi e ao Felipe Caleffi pelo tempo dedicado e conhecimento compartilhado.

Agradeço à empresa Concepa pela disponibilidade e colaboração quanto ao fornecimento dos dados referente ao tráfego da BR/290/RS, utilizados neste trabalho.

Agradeço aos amigos e futuros colegas de profissão que conheci na UFRGS, responsáveis por tornar a jornada acadêmica mais leve, mais prazerosa e mais feliz. Pelas manhãs, tardes e noites de estudos, almoços no RU e festas sempre acompanhados de muitas risadas, companheirismo e cumplicidade.

Agradeço às amigas de longa data, responsáveis também pela construção da minha personalidade e caráter. Por serem as melhores irmãs que eu poderia escolher, por se fazerem presentes nos momentos mais importantes, por crescerem comigo e por terem a solução de (quase) todos os problemas. Pelas experiências, medos e angústias compartilhados, e principalmente por todas as alegrias proporcionadas ao longo desses anos.

Agradeço ao Maurício por todo o incentivo, motivação, palavras de conforto e carinho durante essa caminhada. Pela compreensão nos momentos em que fui ausente, pelos abraços apertados e pelo apoio nas horas mais difíceis.

E agradeço especialmente aos meus pais, Maria Cristina e Irineu, e ao meu irmão Felipe, pelo amor incondicional. Por acreditarem em mim, por sonharem comigo e por mostrarem o verdadeiro sentido da palavra família. Vocês são minha fonte de inspiração e meu porto seguro.

“Precisamos dar um sentido humano às nossas construções. E, quando o amor ao dinheiro, ao sucesso nos estiver deixando cegos, saibamos fazer pausas para olhar os lírios do campo e as aves do céu”.

Érico Veríssimo

RESUMO

A dinâmica de um sistema de transportes está relacionada com a forma como a sua estrutura física e seus usuários interagem. A exemplo, ao passo que a demanda por transportes aumenta, é necessário que o sistema se adeque de forma a absorver esse acréscimo de usuários e manter um determinado nível de qualidade no serviço oferecido. Contudo, fatores externos ao sistema, como condições meteorológicas adversas, podem interferir nessa dinâmica e acarretar em perdas de velocidades e diminuição na capacidade da via, alterando o comportamento e desempenho operacional da corrente de tráfego. Partindo-se dessa ideia, o presente trabalho buscou analisar os impactos da incidência de chuva e neblina na corrente de tráfego do km 96 da BR/290/RS, e compará-los a resultados obtidos e descritos em estudos já realizados. Para tanto, dados que dizem respeito à velocidade e fluxo do tráfego do km-96 da BR/290/RS foram associados a dados da meteorologia correspondente ao mesmo intervalo de tempo. As curvas fluxo-velocidade foram traçadas de forma a obter-se o comportamento da corrente de tráfego nos intervalos de tempo bom, intervalos com incidência de chuva leve a moderada, chuva forte e intervalos com incidência de neblina, e a análise do comportamento da velocidade média dos veículos e da oscilação na capacidade da via em cada cenário foi feita tanto para a condição de fluxo livre quanto para a condição de congestionamento. Observou-se que, tanto com incidência de chuva leve a moderada quanto com incidência de chuva forte, as quedas da velocidade média foram mais expressivas na condição de congestionamento, chegando a 8% no cenário de chuva leve a moderada e 25,4% no de chuva forte. Em contrapartida, sob influência de neblina a queda da velocidade média observada na condição de fluxo livre foi de 6,25%, enquanto na condição de congestionamento a queda chegou a apenas 1%. No que diz respeito às oscilações na capacidade da via, observou-se uma queda expressiva de 30% sob condições de chuva forte. Ademais, os resultados encontrados corroboram a ideia de que condições meteorológicas adversas interferem no desempenho operacional do fluxo de veículos. A modelagem do comportamento da corrente de tráfego nessas situações pode ser de grande valia para estratégias do gerenciamento de tráfego, auxiliando em tomadas de decisões e soluções para a diminuição de congestionamentos, geração de filas e aumento dos tempos de viagem.

Palavras-chave: Velocidade. Capacidade. Fluxo de Tráfego. Chuva. Neblina.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Etapas do trabalho de conclusão	17
Figura 2 – Diagrama de relações do fluxo de tráfego	26
Figura 3 – Caracterização dos diferentes níveis de serviço	32
Figura 4 – Representação gráfica da relação fluxo de tráfego <i>versus</i> velocidade	34
Figura 5 – Curvas de velocidade para diferentes condições meteorológicas	36
Figura 6 – Impacto da visibilidade na velocidade de fluxo livre para Minneapolis/St. Paul	38
Figura 7 – Variação do fator de ajuste meteorológico para velocidade de fluxo livre em relação à intensidade de chuva	39
Figura 8 – Relação entre fluxo e velocidade da Rodovia Castelo Branco	41
Figura 9 – Indicação da localização do km 96 da BR/290/RS	47
Figura 10 – Indicação da distância entre o ponto de captação dos dados de tráfego e o ponto de captação dos dados meteorológicos	47
Figura 11 – Comportamento do fluxo de veículos no km 96 da BR/290/RS ao longo do dia 08 de maio de 2013.....	49
Figura 12 – Comportamento da velocidade dos veículos no km 96 da BR/290/RS ao longo do dia 08 de maio de 2013	49
Figura 13 – Velocidade <i>versus</i> fluxo de veículos no km 96 da BR/290/RS sob condições de tempo seco, chuva leve a moderada e chuva forte	51
Figura 14 – Velocidade <i>versus</i> fluxo de veículos no km 96 da BR/290/RS com e sem incidência de neblina	54
Figura 15 – Comportamento da corrente de tráfego nas diferentes faixas do km 96 da BR/290/RS	56
Figura 16 – Relação fluxo-velocidade da faixa 1 do km 96 da BR/290/RS	57

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Intensidade de chuva	44
Quadro 2 – Intensidade de chuvisco	45
Quadro 3 – Impacto das condições meteorológicas sobre a velocidade média da corrente de tráfego e capacidade da via	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Definição das bandas de nível de serviço conforme capacidade da via	33
Tabela 2 – Mudança média na intensidade de tráfego na presença de condições meteorológicas adversas	44
Tabela 3 – Características operacionais do trecho em estudo	48
Tabela 4 – Velocidade média dos veículos antes e depois do colapso da corrente de tráfego sob condições de tempo seco, chuva leve a moderada e chuva forte	52
Tabela 5 – Velocidade média dos veículos antes e depois do colapso da corrente de tráfego com e sem incidência de neblina	54

LISTA DE SIGLAS

ARTESP – Agência Reguladora de Serviços Públicos Delegados de Transporte do Estado de São Paulo

ASOS/AWOS – *Automated Surface Observing System and Automated Weather Observing System*

CCR – Companhia de Concessões Rodoviárias

CONCEPA – Concessionária da Rodovia Osório-Porto Alegre

DAER – Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem

IPMet/UNESP – Instituto de Pesquisas Meteorológicas/Universidade Estadual Paulista

LOS – *Level of Service*

REDEMET – Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

LISTA DE SÍMBOLOS

u – velocidade (km/h)

u_f – velocidade de fluxo livre (km/h)

u_0 – velocidade crítica (km/h)

k – densidade (veículo/km/faixa)

k_j – densidade de congestionamento (veículo/km/faixa)

k_0 – densidade crítica (veículo/km/faixa)

q – fluxo de tráfego (veículo/hora/faixa)

q_m – fluxo de tráfego crítico (veículo/h/faixa).

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 DIRETRIZES DA PESQUISA	15
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA	15
2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA	15
2.2.1 Objetivo Principal	15
2.2.2 Objetivos Secundários	15
2.3 PRESSUPOSTO	16
2.4 PREMISA	16
2.5 DELIMITAÇÕES	16
2.6 LIMITAÇÕES	16
2.7 DELINEAMENTO	17
3 SISTEMA DE TRANSPORTE	19
3.1 CONCEITO	19
3.2 USUÁRIO	20
3.3 VEÍCULO	20
3.4 VIA	21
4 METODOLOGIAS DE ANÁLISE DE DESEMPENHO DO TRÁFEGO	23
4.1 ELEMENTOS DO TRÁFEGO	23
4.1.1 Volume e Taxa de Fluxo de Tráfego	23
4.1.2 Velocidade	24
4.1.3 Densidade	25
4.1.4 Headway	25
4.1.5 Capacidade	25
4.2 ANÁLISE DO FLUXO DE TRÁFEGO	26
4.3 NÍVEL DE SERVIÇO	30
5 ESTUDOS SIMILARES	35

5.1 INFLUÊNCIA DA METEOROLOGIA NO TRÁFEGO: ESTUDO 1	37
5.2 INFLUÊNCIA DA METEOROLOGIA NO TRÁFEGO: ESTUDO 2	39
5.3 INFLUÊNCIA DA METEOROLOGIA NO TRÁFEGO: ESTUDO 3	40
6 OBTENÇÃO DE DADOS	43
6.1 DADOS DO TRÁFEGO	43
6.2 DADOS METEOROLÓGICOS	44
7 CARACTERIZAÇÃO DO TRECHO EM ESTUDO	46
8 RESULTADOS E DISCUSSÕES	51
8.1 INFLUÊNCIA DA INCIDÊNCIA DE CHUVA	51
8.2 INFLUÊNCIA DA INCIDÊNCIA DE NEBLINA	53
8.3 IMPACTOS NO NÍVEL DE SERVIÇO	55
9 CONSIDERAÇÕES FINAIS	59
REFERÊNCIAS	61

1 INTRODUÇÃO

O transporte de pessoas e cargas é algo inerente ao cotidiano da população. Seja para fins de trabalho, lazer ou movimentação de mercadorias, algum meio de transporte acaba por ser utilizado para a locomoção de indivíduos e produtos. Para tanto, se faz necessário um sistema viário que atenda a demanda de forma eficiente, mantendo-se um nível de qualidade do serviço oferecido.

O *Highway Capacity Manual* (TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, 2010) traz, dentre outras, uma metodologia de análise de três elementos básicos que descrevem um fluxo de tráfego. Esses elementos são analisados a partir de condições específicas, tais como boas condições climáticas e de pavimentação, fluxo de tráfego livre e usuários familiarizados com a via. Condições adversas podem trazer alterações no comportamento do fluxo de veículos e, conseqüentemente, no desempenho esperado do sistema, como o aumento de densidade de veículos e diminuição da velocidade de fluxo livre. Goodwin (2002) aponta que eventos climáticos afetam o comportamento do condutor, a segurança e a mobilidade da via. Tem-se um aumento dos *headways*, diminuição das taxas de aceleração e redução da velocidade, aumento dos atrasos, congestionamentos, e redução na capacidade da via. Ainda, conforme citado por Agarwal et al. (2005), com a falta de conhecimento em relação aos impactos das condições meteorológicas nos padrões de tráfego, não se tem uma estimativa das reduções de velocidade e capacidade do sistema viário que permita uma previsão e simulação dos impactos, o que pode comprometer as estratégias de gerenciamento de tráfego.

O presente trabalho busca analisar o comportamento de tráfego da BR/290/RS, no trecho do quilômetro 96 sentido interior-capital, sob a influência de determinados fenômenos meteorológicos – tais como chuva e neblina – e correlacionar os resultados obtidos com o estimado pela literatura. Ter uma previsão do comportamento do condutor em situações desfavoráveis pode trazer benefícios para o gerenciamento do tráfego, como uma ferramenta de auxílio no gerenciamento ativo de rodovias e prevenção de acidentes.

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

As diretrizes para o desenvolvimento do trabalho, descritas a seguir, elucidam os elementos e informações que servirão de base para o encaminhamento do estudo a ser desenvolvido.

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

O questionamento a ser respondido com o estudo proposto é: sabendo-se que as condições meteorológicas interferem no desempenho do tráfego de uma via, como isso acontece no trecho estudado e como esses resultados se apresentam comparativamente ao que a bibliografia descreve?

2.2 OBJETIVO DA PESQUISA

Os objetivos da pesquisa estão classificados em principal e secundários e são descritos a seguir.

2.2.1 Objetivo principal

O objetivo principal do trabalho é a análise da influência das condições meteorológicas no desempenho operacional do tráfego da Rodovia BR/290/RS, no trecho do quilômetro 96 sentido interior-capital, e como esses resultados se apresentam comparativamente a resultados descritos em outros trabalhos.

2.2.2 Objetivos Secundários

Os objetivos secundários do trabalho são:

- a) a caracterização do desempenho operacional da rodovia, no trecho estudado, em condições de tempo bom, através da relação entre fluxo e velocidade da via;

- b) a caracterização do desempenho operacional da rodovia, no trecho estudado, em condições meteorológicas adversas – como chuva e neblina – através da relação entre fluxo e velocidade da via.

2.3 PRESSUPOSTO

O trabalho tem como pressuposto que os dados coletados e utilizados para a análise do desempenho do tráfego da BR/290/RS, no trecho estudado, são válidos e garantem um grau de confiabilidade adequado ao estudo proposto.

2.4 PREMISSA

O trabalho tem por premissa que o desempenho de uma via é afetado pelas condições climáticas presentes, sendo assim de suma importância estudar e conhecer o comportamento do tráfego no cenário do nosso dia-a-dia.

2.5 DELIMITAÇÕES

A coleta de dados e análise de desempenho do tráfego da Rodovia BR/290/RS dizem respeito ao trecho do quilômetro 96, sentido interior-capital, situado na região metropolitana de Porto Alegre.

2.6 LIMITAÇÕES

Pode-se apontar duas limitações do estudo a ser desenvolvido:

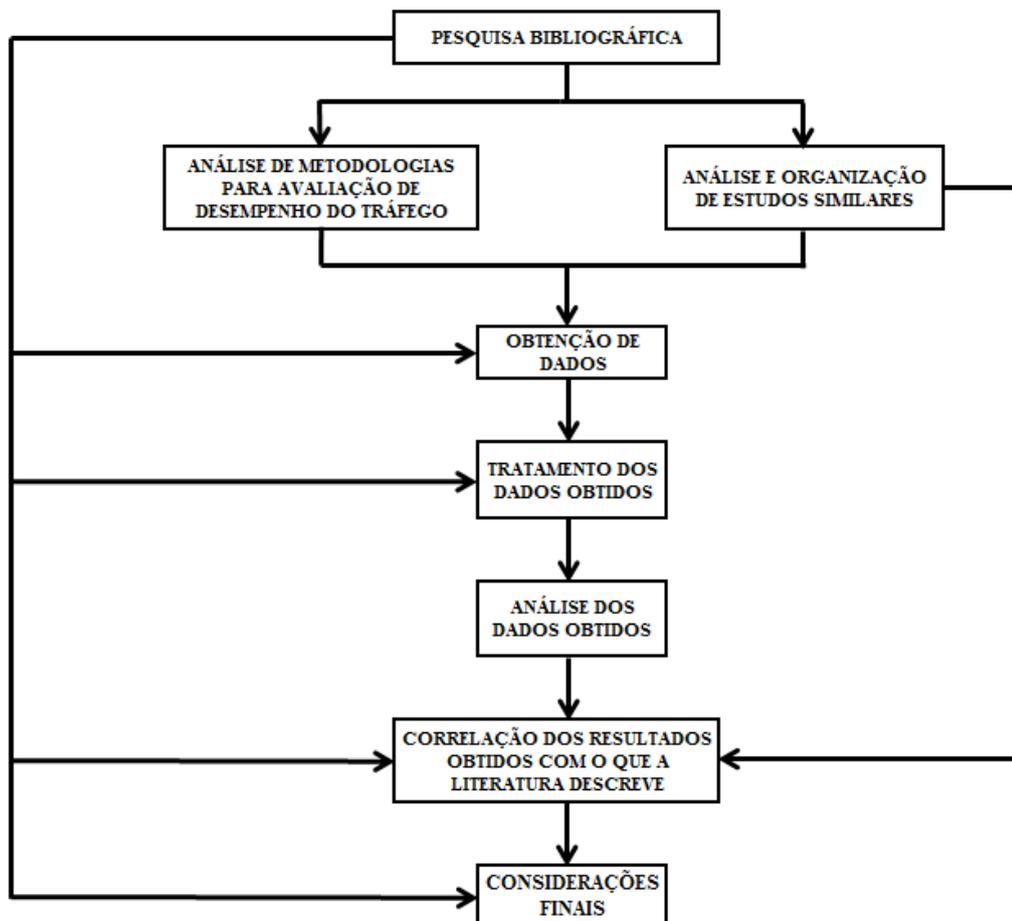
- a) os dados referentes ao comportamento do tráfego serão obtidos por meio de dispositivos que estão alocados ao longo da Rodovia BR/290/RS. Desta forma, a análise do desempenho do tráfego fica restrita aos trechos em que há a presença desses dispositivos;
- b) os dados referentes às condições climáticas, no período de tempo estudado, foram obtidos através da Rede Meteorológica do Comando da Aeronáutica. Ao passo que as características climáticas podem sofrer variações bruscas ao longo de um trecho, a veracidade dos dados obtidos está limitada ao raio de alcance em que a informação pode ser considerada confiável.

2.7 DELINEAMENTO

O trabalho será realizado conforme o roteiro apresentado abaixo. Suas etapas são ilustradas pelo diagrama da figura 1:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) análise de metodologias para avaliação de desempenho do tráfego de veículos em vias de fluxo ininterrupto;
- c) descrição e análise de estudos similares já publicados;
- d) obtenção de dados;
- e) tratamento dos dados obtidos;
- f) análise dos dados obtidos;
- g) correlação dos resultados obtidos com o que a literatura descreve;
- h) considerações finais.

Figura 1 – Etapas do trabalho de conclusão



(fonte: elaborado pela autora)

A etapa da pesquisa bibliográfica foi o primeiro passo para o início do trabalho de conclusão e foi desenvolvida ao longo de todo o trabalho, sendo de suma importância para a construção da bagagem de conhecimento e informação necessária para a evolução do assunto escolhido. Ela foi alimentada com base em livros, manuais, artigos, trabalhos publicados e materiais relacionados ao tema abordado.

Com a pesquisa bibliográfica encaminhada, foi feito um levantamento da base conceitual de um sistema viário, dos elementos que constituem e alimentam esse sistema e de metodologias de análise do tráfego de veículos e seu desempenho em vias de fluxo ininterrupto. Com isso, foi definida a forma de avaliação do desempenho do tráfego no trecho escolhido.

Outros estudos similares ao que foi proposto já foram publicados. Foram feitas análise e organização dos resultados por eles obtidos, compondo-se o material que serviu de base para as últimas etapas do trabalho.

Para a realização do estudo, foram utilizados dados que dizem respeito à velocidade dos veículos que trafegam na via, fluxo de veículos no trecho em questão e a condições climáticas presentes. Esses dados foram obtidos por meio da Concepa e da Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica. A Concepa, empresa responsável por administrar o trecho da rodovia BR/290/RS que liga os municípios de Osório e Porto Alegre, possui dispositivos espalhados ao longo do trecho de concessão, os quais captam dados referentes ao tráfego de veículos. Já a Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica, possui estações que fornecem boletins meteorológicos voltados à aviação civil e militar, e que são disponibilizados para a comunidade.

A partir do tratamento dos dados, foi feita uma correlação do comportamento do tráfego com as condições climáticas correspondentes ao intervalo de tempo e espaço estudados. A partir disso, foi feita a análise do desempenho do tráfego para o cenário configurado.

A literatura traz estudos sobre a alteração no desempenho do tráfego de uma via em determinados cenários. Com os resultados obtidos na análise dos dados, foi feita uma correlação dos resultados obtidos com o que seria esperado de acordo com a bibliografia.

Na última etapa, as considerações finais encerram o trabalho de conclusão, trazendo um balanço geral do que foi discutido ao longo do trabalho e dos resultados que foram encontrados.

3 SISTEMA DE TRANSPORTE

Este capítulo tem por objetivo introduzir conceitos básicos de um sistema de transporte, apresentar os elementos que compõe o sistema e como estes elementos podem influenciar no desempenho operacional de uma via.

3.1 CONCEITO

O deslocamento de pessoas e mercadorias depende de uma estrutura de vias e rotas que possibilite que esta locomoção se dê de forma segura e eficaz. Conforme a demanda cresce, se faz necessário estruturas mais complexas que consigam articular os elementos que compõem o sistema viário, de forma a manter um nível de qualidade do serviço oferecido.

Bazzan e Klügl [2014] explanam que um sistema de transporte é composto por usuários da via – sejam eles condutores, passageiros, pedestres, ciclistas, motociclistas –, veículos (comerciais ou privados), ônibus e outros meios de transportes, ruas e rodovias e por dispositivos de controle e convenções de tráfego, leis, iluminação, etc. A dinâmica entre os elementos que compõe o sistema de transporte está intimamente ligada ao desempenho apresentado por uma via.

Segundo Bijleveld e Churchill (2009), acredita-se que as condições meteorológicas influenciam alguns aspectos que refletem, por exemplo, na decisão de realizar a viagem, escolha do tipo de modal, visibilidade, interação entre veículo e pista e mudanças de comportamento do condutor. Estudos apontam que, na presença de eventos como chuva intensa, a condição meteorológica pode influenciar na decisão de realizar ou não uma viagem (em sua maioria de caráter recreacional) ou ainda adiá-la, e que condutores de motocicletas e bicicletas podem optar por outro tipo de modal, como o automóvel particular ou transporte público.

Na sequência do capítulo serão discutidos alguns dos aspectos do sistema viário citados acima, e como eles podem estar ligados ao desempenho operacional da via a qual estão inseridos.

3.2 USUÁRIO

Os usuários do sistema viário são peças importantes para o entendimento do funcionamento e desempenho do tráfego. O comportamento humano e a performance do usuário em determinadas situações refletem diretamente no que acontece na via, sendo importante entender como essa interação usuário - sistema acontece. Segundo Hobbs (1974, p. 227, tradução nossa), “Antes de analisar as complexidades do comportamento [humano], é necessário considerar, em termos simples, a fisiologia básica humana e o sistema de percepção. Cada indivíduo possui certos atributos físicos básicos, como audição, visão, força e mobilidade.”. Pignataro (1973) cita ainda quatro elementos relativos a fatores físicos humanos: percepção – que está relacionada a detectar um estímulo ou objeto –, intelecto – que identifica e compreende o estímulo –, julgamento ou emoção – que estão relacionados com a tomada de decisão e delineamento da ação –, e reação – que envolve a execução da decisão, englobando a coordenação motora do usuário –. Isto é, a percepção que o condutor tem frente a situações adversas no trânsito induz a uma mudança de comportamento de acordo com o seu julgamento. A exemplo, Bijleveld e Churchill (2009) comentam que, em resposta a um aumento de risco percebido, o fluxo de tráfego passa a incorporar velocidades mais baixas e aumentar os headways entre veículos, observando-se uma postura mais cautelosa por parte dos condutores. Hobbs (1974) ainda aponta que fatores como motivação, ambiente, educação e design da via influenciam no comportamento do condutor.

Bazzan e Klügl (2013, p. 375, tradução nossa) complementam:

Dado o aumento da complexidade dos transportes e sistema de tráfego, os quais surgem do estilo de vida moderno e de novos conceitos de organização do transporte, não apenas novas técnicas devem ser implantadas, mas também as escolhas individuais devem ser melhor compreendidas como um todo para que o sistema se torne mais eficiente.

3.3 VEÍCULO

Os veículos configuram o objeto utilizado para a locomoção dos usuários no sistema de transporte. As vias são projetadas procurando atender a sua demanda e aos tipos de veículos que ali trafegam, sejam eles carros de passeio, ônibus ou caminhões. Hobbs (1974) explana que as características dos veículos são menos variáveis do que as do usuário, por exemplo, já

que muitas vezes atributos como peso, tamanho e itens elementares do veículo como freios e sistema de sinalização luminosa são regulamentados por legislação.

É importante observar alguns aspectos do veículo que trafega por uma via. Hobbs (1974) elenca alguns desses aspectos, tais como a visibilidade que o condutor tem, a partir do seu veículo, em relação à via e ao ambiente pelo qual trafega (espelhos, para-brisa, janelas), o desempenho motor do veículo, freios, estabilidade, dimensões do carro e sistema de sinalização luminosa, como faróis dianteiros e traseiros e seu desempenho em situações de escuridão, neblina e chuva. A tomada de decisão do condutor em determinadas situações está diretamente relacionada ao seu veículo. Conhecendo e estando familiarizado com ele, o condutor domina também as limitações e o desempenho que seu objeto de transporte lhe oferece, tendo assim ferramentas para otimizar e maximizar a utilização do veículo, seja em situações normais de tráfego como em situações adversas ou de risco, que requerem uma postura mais prudente do condutor.

3.4 VIA

As vias de um sistema de transporte são elementos básicos da estrutura física do sistema. O traçado e a geometria, segundo Pignataro (1973), estão intimamente associados ao potencial e às limitações do usuário da via e seu veículo. O autor elenca alguns tópicos que devem ser considerados no projeto de uma rodovia, seja ele um projeto novo ou um projeto de aperfeiçoamento (PIGNATARO, 1973, p. 20, tradução nossa):

- a) o projeto deve ser adequado para o volume de tráfego futuro estimado – tanto para a média diária quanto para horários de pico –, para as características dos veículos que ali trafegam e para a velocidade de projeto;
- b) o projeto deve ser seguro para o tráfego de veículos e inspirar confiança à maioria dos usuários;
- c) o projeto deve ser consistente, e deve evitar mudanças bruscas no alinhamento, grade ou visibilidade;
- d) o projeto deve ser completo. Deve incluir o cuidado necessário com o entorno da rodovia e fornecer dispositivos de controle de tráfego essenciais, como sinalização e iluminação apropriadas;
- e) o projeto deve ser economicamente viável, tanto na execução quanto para manutenção futura.

Ainda, a manutenção das vias é imprescindível, ao passo que a condição do pavimento pode ser um elemento chave nos dias de chuva. O acúmulo de água na superfície do pavimento pela deficiência do sistema de drenagem e falhas construtivas, somado a desgastes na camada de rugosidade do pavimento, pode causar instabilidade nos veículos que trafegam pela via. Segundo Bernucci et al. (2008), a aquaplanagem, fenômeno no qual há uma perda de contato entre o pneu e a superfície da pista de rolamento devido à presença de um filme de água não rompido pelos pneus ou pela textura da pista, pode levar à perda de controle da direção e comprometimento da frenagem do veículo. Por conseguinte, nessa situação espera-se do condutor uma postura mais conservadora, trafegando com velocidades menores, o que acaba refletindo no desempenho da rodovia.

O fluxo de tráfego de um sistema rodoviário é sensível a todos os elementos que o compõe. Seu comportamento acaba sendo um reflexo da interação entre seus usuários, veículos que ali trafegam e características físicas de suas vias. Perturbações na corrente de tráfego, como a incidência de acidentes, assim como a presença de chuva e neblina, são elementos externos ao sistema que acabam interferindo na conduta dos veículos, e alterando o comportamento esperado do tráfego se comparado a situações habituais.

4 METODOLOGIAS DE ANÁLISE DE DESEMPENHO DO TRÁFEGO

Neste capítulo, serão abordadas metodologias de análise de desempenho do tráfego de uma via de fluxo ininterrupto. Serão definidos os elementos que caracterizam e influenciam o fluxo de veículos dentro de um sistema viário, e como esses elementos estão relacionados na dinâmica de transportes.

4.1 ELEMENTOS DO TRÁFEGO

O fluxo de tráfego de veículos é composto por uma série de parâmetros e elementos que definem e descrevem seu comportamento. Bazzan e Klügl [2014] trazem que a descrição do fluxo de tráfego envolve mensurar e analisar parâmetros que se dividem em duas categorias: macroscópica (volume, velocidade e densidade do fluxo de tráfego) e microscópica: (velocidade individual de cada veículo, *headway* e brechas). Os autores ressaltam também que o tipo de via sobre a qual é feita a análise tem papel fundamental no comportamento de tais parâmetros.

Esses elementos, macroscópicos e microscópicos, serão discutidos nos tópicos a seguir.

4.1.1 Volume e Taxa de Fluxo de Tráfego

Volume de tráfego e taxa de fluxo de tráfego, embora sejam ambos parâmetros que quantificam o número de veículos que passam em um ponto da pista ou da via durante um dado intervalo de tempo, têm definições distintas (TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, 2010, p. 4-2, tradução nossa):

- a) Volume: número total de veículos que passam em um determinado ponto ou seção de uma pista ou via, em um dado intervalo de tempo, podendo ser expresso anos, dias, horas ou minutos;
- b) Taxa de fluxo de tráfego: equivalente à taxa horária com a qual veículos passam por um dado ponto ou seção de uma pista ou via, durante um dado intervalo de tempo menor do que 1h.

4.1.2 Velocidade

O conceito de velocidade está implícito no nosso dia a dia. Tanto para deslocamentos com algum tipo de veículo motor, ou a pé, a noção de vencer determinado percurso em um intervalo de tempo é trivial. O *Highway Capacity Manual* (TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, 2010) adota a velocidade como um indicador importante na avaliação da qualidade de serviço que é oferecida aos usuários da via, e a define como uma taxa de movimento expressa através da distância percorrida por unidade de tempo. O manual salienta também que, como se observa uma longa distribuição de velocidades individuais de cada veículo em um fluxo de tráfego, um valor representativo deve ser utilizado para caracterizá-lo, e que, para tanto, alguns parâmetros de velocidade podem ser aplicados (TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, 2010, p. 4-4-4-5):

- a) velocidade média de viagem: o fluxo de tráfego é mensurado com base em um tempo de viagem observado em um trecho conhecido da rodovia. É o comprimento de um segmento dividido pelo tempo médio de viagem dos veículos que atravessam esse segmento, incluindo todos os tempos de atraso por paradas;
- b) velocidade média no espaço: termo estatístico que denota a velocidade média baseada no tempo de viagem médio de veículos para percorrer um comprimento de pista. Esse parâmetro é assim chamado porque o tempo médio de viagem pondera a média pelo tempo que cada veículo leva no comprimento de pista ou espaço definidos;
- c) velocidade média temporal: média aritmética das velocidades dos veículos observados que passam por um ponto em uma rodovia; também se refere à velocidade média local. As velocidades individuais dos veículos que passam por um ponto são registradas e é feita a média aritmética;
- d) velocidade de fluxo livre: velocidade média dos veículos em um dado segmento, mensurada em condições de baixo volume, em que os motoristas estão livres para dirigir na velocidade que desejam, sem serem limitados pela presença de outros veículos ou dispositivos de controle de correntes de fluxo de tráfego;
- f) velocidade média de circulação: o fluxo de tráfego é mensurado com base na observação dos tempos de viagem de veículos que cruzam uma seção da rodovia com comprimento conhecido. É o comprimento do segmento dividido pelo tempo médio de circulação dos veículos que cruzam o segmento, em que o tempo de circulação inclui apenas o tempo em que os veículos estão em movimento.

4.1.3 Densidade

Outro parâmetro macroscópico que descreve o fluxo de tráfego é a densidade. Ela é definida pelo número de veículos que ocupa um determinado comprimento de pista ou estrada em um instante particular. Como a medição direta da densidade em campo é difícil de ser obtida, já que requer um ponto estratégico para fotografia, vídeo ou observação significativa de trechos da rodovia, ela pode ser computada através da média de velocidade de viagem e taxa de fluxo, parâmetros os quais podem ser obtidos com mais facilidade. A densidade é um indicador crítico para vias de fluxo ininterrupto, já que caracteriza a qualidade da operação do tráfego. Ela descreve a proximidade de veículos entre si e reflete na liberdade de manobras no fluxo de tráfego (TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, 2010).

4.1.4 Headway

Segundo o *Highway Capacity Manual* (TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, 2010), *headway* pode ser definido como o intervalo de tempo entre dois veículos sucessivos que passam por um determinado ponto da via, medido a partir do mesmo ponto de referência cada veículo.

4.1.5 Capacidade

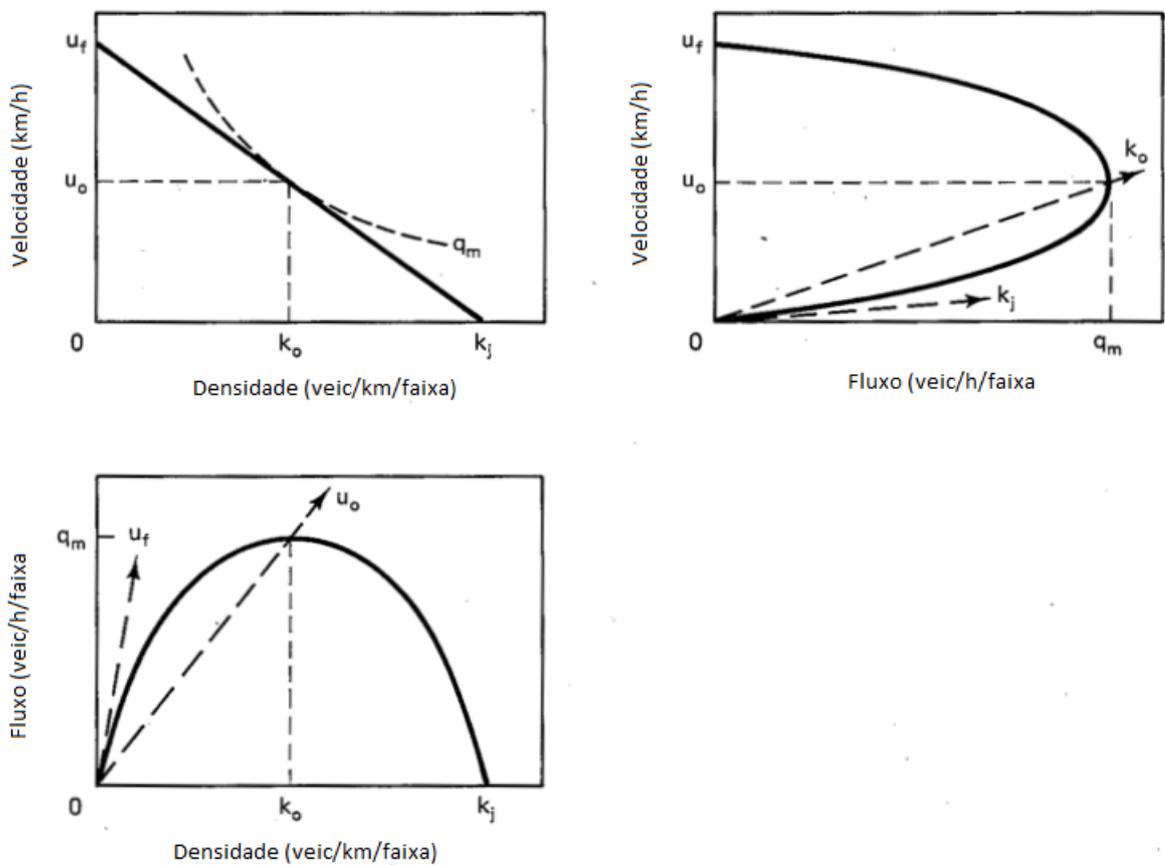
A capacidade de uma via representa a taxa de fluxo máxima de veículos e pessoas que passam por um determinado ponto ou segmento da via, por um determinado período de tempo, e que a via consegue acomodar de forma razoável e segura. Isso não significa que a capacidade seja a taxa de fluxo máxima absoluta, a qual pode variar de um dia para o outro, ou conforme o local. A capacidade está relacionada a uma expectativa de fluxo de tráfego que seja plausível e que atenda a demanda com um nível de qualidade de serviço mínimo, levando em consideração diversos aspectos, como as características da via, condições do tráfego (tipos e distribuição de veículos que trafegam pela via) e dispositivos de controle utilizados (TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, 2010).

4.2 ANÁLISE DO FLUXO DE TRÁFEGO

Os parâmetros definidos na seção anterior estão relacionados, e a dinâmica entre esses elementos que compõe o fluxo de tráfego resulta e explica o comportamento do tráfego de veículos, servindo também de base para a análise do desempenho operacional de uma rodovia.

May (1990) apresenta em sua obra como esses parâmetros se relacionam através de diagramas de fluxo de tráfego e análise dos resultados obtidos, como apresentados na figura 2:

Figura 2 – Diagrama de relações do fluxo de tráfego



(fonte: adaptado de MAY, 1990, p. 284)

Segundo May (1990), o primeiro gráfico da figura, localizado na parte superior esquerda, representa a relação entre densidade e velocidade, sendo apresentada como uma relação linear para fins de simplificação. Do gráfico, tem-se que:

$$u = (u_f) - (u_f / k_j) \times k \quad (\text{equação 1})$$

Sendo:

u = velocidade;

u_f = velocidade de fluxo livre;

k_j = densidade de congestionamento;

k = densidade.

Essa equação indica que a velocidade de fluxo livre (u_f) será alcançada quando a densidade da via (k) for igual à zero. Ao passo que se tem um aumento na densidade da via, a velocidade tende a diminuir até alcançar o fluxo de tráfego máximo, onde se tem os valores de velocidade e densidade críticas (u_0 e k_0). A partir desse ponto, conforme a densidade aumentar, a velocidade do tráfego diminui, até que a densidade alcance seu valor máximo (k_j) e a velocidade (u) seja nula.

Ainda segundo o autor, o fluxo de tráfego pode ser definido pelo produto entre a densidade e a velocidade da via:

$$q = u \times k \quad (\text{equação 2})$$

Sendo:

q = fluxo de tráfego;

u = velocidade;

k = densidade.

O gráfico localizado na parte inferior esquerda da figura 2 indica a relação entre a densidade e o fluxo de tráfego. Conforme analisado por May (1990), essa relação pode ser obtida substituindo-se a equação 1 no termo da velocidade (u) da equação 2:

$$q = u_f \times k - (u_f / k_j) \times k^2 \quad (\text{equação 3})$$

Na medida em que se tem um aumento da densidade, o fluxo de veículos também aumenta e a velocidade tende a diminuir. Quando a densidade crítica (k_0) é alcançada, o fluxo atinge o valor máximo comportado pela via. A partir desse ponto, conforme a densidade continuar aumentando, o fluxo de tráfego passa a diminuir, até que a densidade de congestionamento (k_j) é alcançada e o fluxo se aproxima de zero. A velocidade pode ser representada no gráfico fluxo *versus* densidade pela inclinação das retas radiais que percorrem o gráfico, em que linhas com inclinações mais íngremes representam velocidades mais altas, e a linha horizontal representa velocidade nula. Sabendo-se que a densidade crítica ocorre quando a derivada da equação 3 é igual a zero, a relação entre densidade crítica e densidade de congestionamento é dada por:

$$d_q / d_k = u_f - 2 \times (u_f / k_j) \times k_0$$

$$0 = u_f - 2 \times (u_f / k_j) \times k_0$$

$$k_0 = k_j / 2 \quad (\text{equação 4})$$

Sendo:

k_0 = densidade crítica;

k_j = densidade de congestionamento.

Por fim, o autor expõe também a relação entre fluxo e velocidade, ilustrada na parte superior direita da figura 2. A equação que descreve essa relação pode ser obtida substituindo-se a equação 2 no termo da densidade (k) da equação 1:

$$u = u_f - (u_f / k_j) \times (q / u) \quad (\text{equação 5})$$

E, reorganizando a equação 5 em termos da variável fluxo de tráfego, tem-se:

$$q = ((k_j / u_f) / k_j) \times ((u_f \times u) - u^2) \quad (\text{equação 6})$$

May (1990) descreve que o braço superior da curva fluxo *versus* velocidade representa o regime de fluxo livre, ao passo que o braço inferior representa o regime de congestionamento. No regime de fluxo livre, conforme o fluxo de veículos aumenta, a velocidade tende a diminuir até que o fluxo máximo seja alcançado. A partir desse ponto, a densidade crítica já foi atingida e o fluxo de tráfego passa a diminuir, observando-se ainda a contínua diminuição da velocidade. A densidade pode ser representada no gráfico pela inclinação das retas radiais que percorrem o gráfico, partindo da origem.

Sabendo que o fluxo crítico de veículos (q_m) acontece para a velocidade crítica (u_0), através da equação 6 tem-se que:

$$q_m = (k_j / u_f) \times (u_f \times u_0 - u_0^2) \quad (\text{equação 7})$$

Partindo da relação entre fluxo, densidade e velocidade apresentada pela equação 2, e adotando que o fluxo crítico (q_m) acontece para a velocidade crítica (u_0) e para a densidade crítica (k_0), chega-se à equação:

$$u_0 \times k_0 = (2k_0 / u_f) \times (u_f \times u_0 - u_0^2)$$

$$u_0 = u_f / 2 \quad (\text{equação 8})$$

Com a equação 2 e a equação 8, tem-se a forma mais simplificada para a equação do fluxo crítico (q_m):

$$q_m = (u_0 \times k_0) = (u_f \times k_j) / 4 \quad (\text{equação 9})$$

Os três parâmetros discutidos: velocidade, densidade e fluxo de tráfego descrevem o comportamento do fluxo de tráfego numa via de fluxo ininterrupto, e suas relações serão utilizadas para a análise dos dados de tráfego que serão coletados.

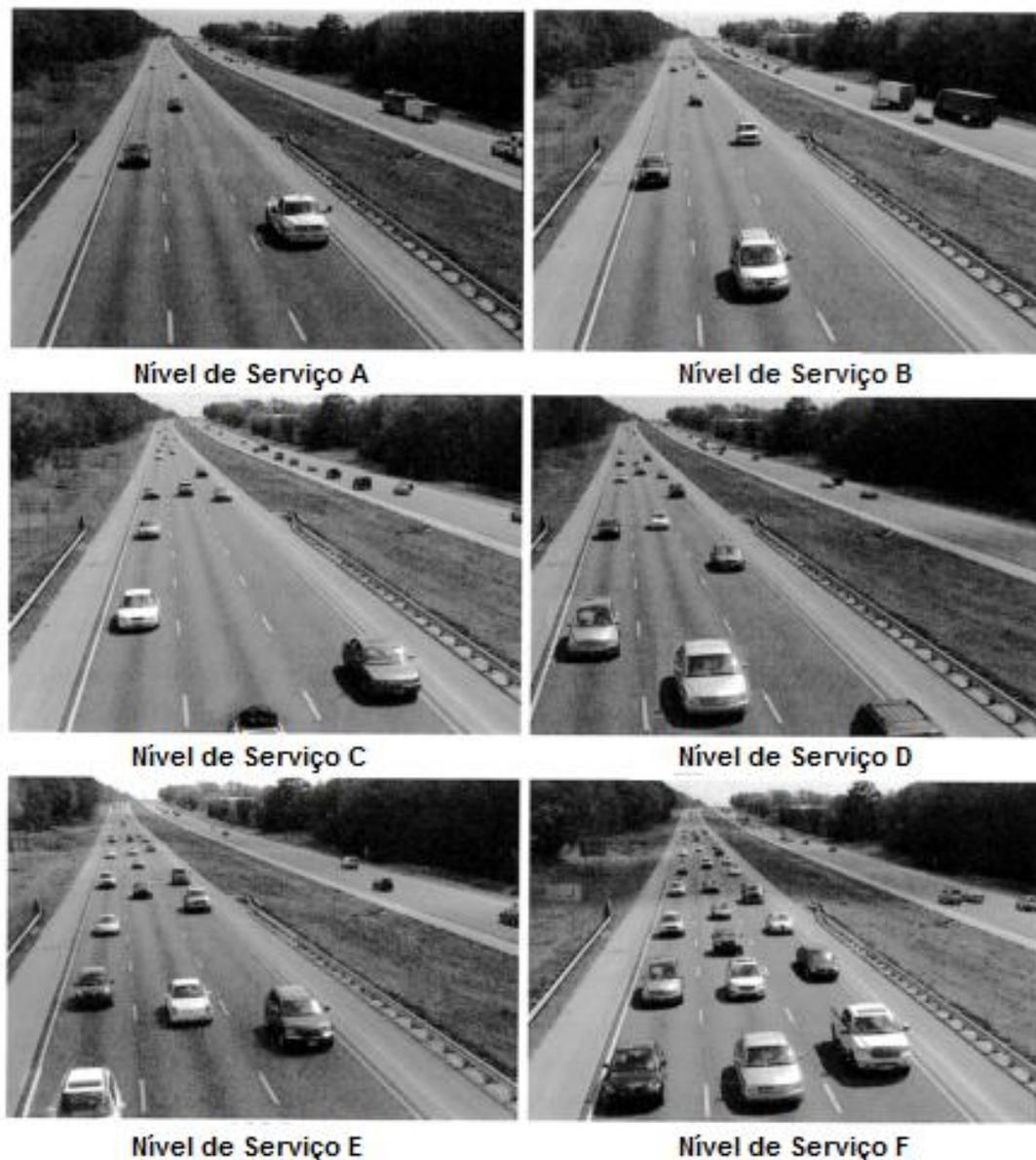
4.3 NÍVEL DE SERVIÇO

O desempenho operacional de uma via depende da interação entre veículos, usuários e vias do sistema, o que torna o fluxo de tráfego muitas vezes instável. Um dos objetivos da estrutura de um sistema viário é atender a demanda por transporte, oferecendo um determinado grau de satisfação a seu usuário. Contudo, cada usuário tem uma percepção diferente do nível de satisfação que as vias lhe oferecem. Dessa forma, o *Highway Capacity Manual* (TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, 2010) define o nível de serviço de uma via (LOS) (*Level of Service*): uma medida de desempenho que caracteriza a qualidade das condições operacionais de uma via, procurando refletir a perspectiva do usuário. O manual traz também alguns fatores que influenciam na percepção do usuário em relação à qualidade do serviço oferecido, tais como: tempos de viagem, atrasos, velocidade desenvolvida ao longo do percurso, segurança, interrupções no tráfego, liberdade de manobras, conforto e conveniência.

De acordo com o *Highway Capacity Manual* (TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, 2010), os níveis de serviço representam o comportamento do tráfego em bandas que variam de A a F: o nível de serviço A corresponde à melhor condição de tráfego sob a perspectiva dos usuários, ao passo que o nível F corresponde à pior. A análise do nível de serviço é feita com base na densidade de veículos que a via apresenta. Considerando-se um segmento de

uma *free way*, as condições básicas consideradas para se alcançar a capacidade máxima da rodovia, e definir os níveis de serviço, são tempo bom, ausência de acidentes ou incidentes, o trecho não deve pertencer a uma zona destinada a atividades de negócios e a via deve apresentar boas condições de pavimentação. Outros parâmetros também são ponderados, os quais podem sofrer adaptações conforme a metodologia utilizada para o trecho em questão. Dentre eles, pode-se citar a ausência de veículos pesados no fluxo de tráfego, motoristas familiarizados com a via e pista com largura mínima de aproximadamente 3,7 metros e acostamento mínimo de aproximadamente 1,8 metros. A figura 3 traz um exemplo da caracterização dos níveis de serviço.

Figura 3 – Caracterização dos diferentes níveis de serviço



(fonte: adaptado de TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, 2010. p. 11-5)

O nível de serviço A corresponde à situação em que a via opera na condição de fluxo livre, e na qual eventuais incidentes ou perturbações no tráfego são absorvidos facilmente. O nível de serviço B ainda apresenta razoavelmente operação em fluxo livre, ao passo que as habilidades de manobras dos motoristas passam a ser ligeiramente restritas mesmo que incidentes ou perturbações ainda sejam facilmente absorvidos. O nível de serviço C, mesmo mantendo a velocidade do fluxo de tráfego próxima à velocidade de fluxo livre, já apresenta restrições nas manobras realizadas pelos condutores, e requer maior atenção por parte do usuário. Neste estágio, o sistema absorve pequenos incidentes, mas a queda na qualidade do nível de serviço

será significativa. O nível de serviço D começa a apresentar um declínio na velocidade em função do aumento de tráfego e aumento mais rápido da densidade de veículos na via. A liberdade de manobras se torna bastante limitada, e qualquer avaria no tráfego pode gerar filas, já que o fluxo de tráfego conta com pouco espaço para absorver perturbações. O nível de serviço E representa a operação na capacidade da via, tornando a corrente de tráfego instável em virtude da pequena quantidade de lacunas que possibilitem manobras. Na capacidade, qualquer incidente ou distúrbio provavelmente causará falha no fluxo de tráfego e filas substanciais, já que neste estágio a corrente de tráfego não consegue absorver perturbações, por menores que sejam. Por fim, o nível de serviço F representa o colapso no fluxo de tráfego e conseqüente formação de filas antes dos pontos de gargalo. Tal colapso pode ser causado por incidentes temporários que reduzem a capacidade em um ponto da via, ou por locais onde rotineiramente há incidência de congestionamento em razão de pontos de entrada e saída de veículos e diminuição do número de faixas, por exemplo. Em qualquer um dos níveis de serviço, falhas na corrente de tráfego ocorrem quando a razão entre a demanda corrente e a capacidade do nível de serviço, ou entre a previsão de demanda e capacidade estimada do nível de serviço, for maior que 1,00 (TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, 2010).

Ainda segundo o *Highway Capacity Manual* (TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, 2010), utiliza-se o parâmetro da densidade de veículos como critério para avaliar o nível de serviço de um segmento de *free way*, já que a velocidade é constante através de uma ampla gama de correntes de tráfego e a razão entre velocidade e capacidade não é diretamente perceptível aos usuários, salvo na capacidade. A tabela 1 mostra os critérios adotados pelo Manual.

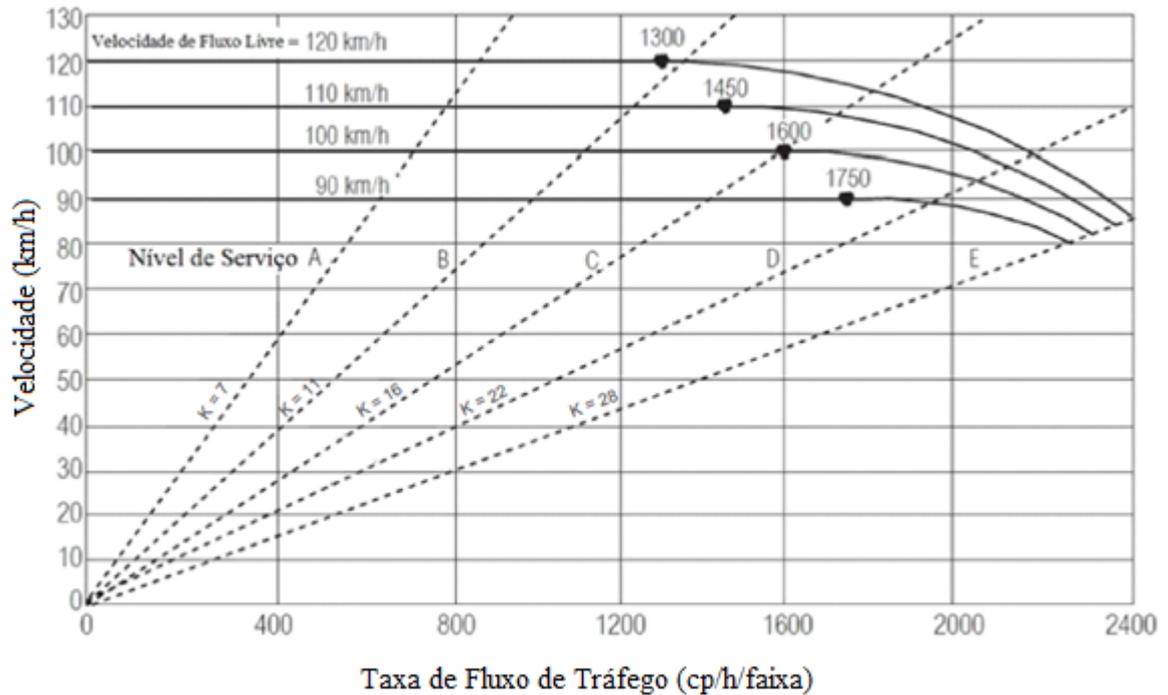
Tabela 1 – Definição das bandas de nível de serviço conforme densidade da via

Nível de Serviço	Densidade (cp/km/faixa)
A	$k \leq 7$
B	$7 < k \leq 11$
C	$11 < k \leq 16$
D	$16 < k \leq 22$
E	$22 < k \leq 28$
F	$k > 28$

(fonte: adaptado de TRANSPORTATION RESEARCH BOAR, 2010, p. 11-7)

A figura 4 representa de forma gráfica os níveis de serviço, a partir da relação entre taxa de fluxo de tráfego (veículos de passeio/h/faixa) e velocidade (km/h). As linhas radiais que partem da origem indicam a densidade, as quais tiveram valores previamente definidos como as fronteiras entre as bandas de cada nível de serviço.

Figura 4 – Representação gráfica da relação fluxo de tráfego *versus* velocidade



(fonte: adaptado de TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, 2000, p. 23-4)

5 ESTUDOS SIMILARES

Os modelos matemáticos utilizados para analisar a interação entre as variáveis do tráfego muitas vezes não levam em consideração a influência da meteorologia. A maior parte dos estudos que consideram, foram desenvolvidos para regiões situadas no hemisfério norte – em que há a presença de fenômenos meteorológicos mais severos –, embora no Brasil já existam estudos publicados e em andamento.

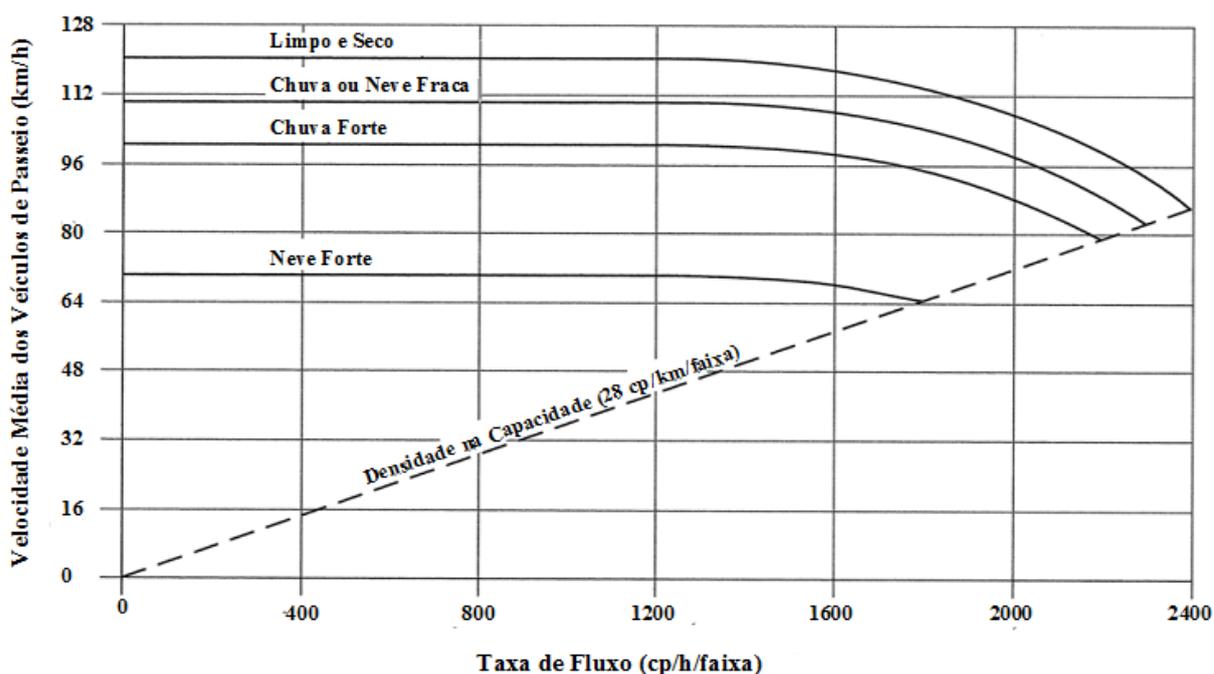
Contudo, ressalta-se a importância de incluir uma avaliação das condições climática presentes para entender melhor a dinâmica do tráfego no dia-a-dia. Hablas (2007, p. 18, tradução nossa) cita que “O clima afeta a operação do sistema de transporte, alterando as configurações de condução, como a performance dos condutores que ajustam seus headways individuais e velocidades em resposta a algum evento meteorológico específico.”. Ele aponta também que a alteração no alcance da visibilidade por precipitações, nevoeiros e respingos produzidos por outros veículos que trafegam na via molhada, bem como temperaturas extremas e ventos fortes, afetam o desempenho do condutor, do veículo e da via. Eventos meteorológicos podem ainda impactar na geometria física da via e em dispositivos de controle, alterando o comportamento da corrente de tráfego e podendo levar à redução da capacidade e velocidade da via e ao aumento do headway entre os veículos e atrasos no tempo de viagem.

O *Highway Capacity Manual* (TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, 2000) faz menção a alguns estudos que foram realizados para avaliar o impacto das condições meteorológicas adversas na capacidade da via. O Manual ilustra um exemplo de como efeitos meteorológicos podem ser apurados através de um gráfico que relaciona a taxa de fluxo de tráfego e a velocidade média de veículos de passeio, considerando uma velocidade de fluxo livre estimada para condições básicas de 120 km/hora.

Embora a versão 2010 do Manual também proponha uma relação entre velocidade média dos veículos e taxa de fluxo sob condições meteorológicas adversas (figura 5), a versão 2000 traz uma discussão pertinente a respeito de estudos realizados. Segundo o Manual, as velocidades apresentadas não são afetadas pela presença de água no pavimento, até que a visibilidade também seja afetada. Isso sugere que a incidência de chuva leve não reflete de forma

significativa na velocidade desenvolvida pelos veículos. Por outro lado, espera-se que, sob influência de chuva forte, o impacto na corrente de tráfego seja expressivo. Com a incidência de chuva leve, observou-se uma redução de 2 km/h em regime de fluxo livre e uma redução de 7 a 13 km/h quando a corrente de tráfego já apresentava velocidades menores, entre 89 e 95 km/h, sem apresentar alterações na capacidade em ambos casos. Já com a incidência de chuva pesada, no regime de fluxo livre as quedas observadas foram de 5 e 7 km/h e de 13 e 16 km/h para velocidades de 89 e 95 km/h, enquanto a estimativa de redução das taxas de fluxo de veículos ficou em torno de 14% a 15%. Ainda que o estudo não proponha um método que permita equalizar as reduções observadas para o regime de fluxo livre, foi proposta uma aproximação dos resultados obtidos, estabelecendo uma queda de 10 km/h nos casos de chuva leve e de 20 km/h nos casos de chuva forte.

Figura 5 – Curvas de velocidade para diferentes condições meteorológicas



(fonte: adaptado de TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, 2010, p. 10-31)

Outros estudos elaborados com o intuito de estudar a influência de chuva e neblina no desempenho do tráfego serão comentados nos próximos itens.

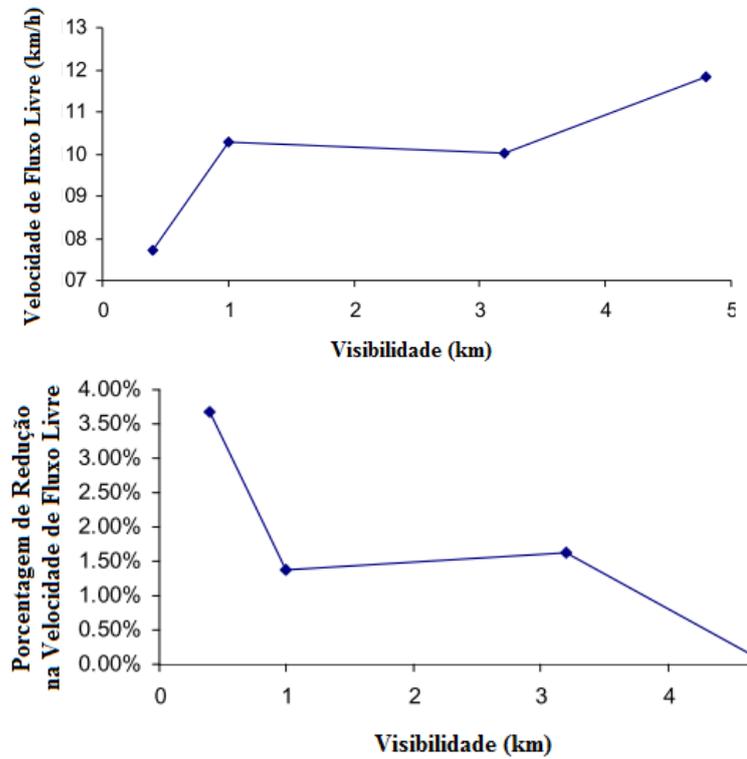
5.1 INFLUÊNCIA DA METEOROLOGIA NO DESEMPENHO DO TRÁFEGO: ESTUDO 1

Um estudo realizado por Hablas (2007) na Virgínia, Estados Unidos, procura quantificar os impactos de fenômenos meteorológicos na velocidade de fluxo livre da corrente de tráfego, em vias expressas, através da análise de dados de precipitação e visibilidade para as cidades de Baltimore, Minneapolis/St. Paul e Seattle, Estados Unidos.

Os dados meteorológicos foram coletados a partir de estações que utilizam os sistemas ASOS/AWOS (*Automated Surface Observing System and Automated Weather Observing System*) (Sistema Automatizado de Observação de Superfície e Sistema Automatizado de Observação Meteorológica), ao passo que a coleta de dados de tráfego foi feita através de detectores presentes ao longo dos trechos estudados. Para a manipulação dos dados meteorológicos, os dados de chuva foram divididos em três categorias, e os referentes à visibilidade, divididos em quatro grupos (alcance de visibilidade maior ou igual a 4,8 km; entre 4,8 e 1,6 km; entre 1,6 e 0,8 km; e menor ou igual a 0,8 km) (HABLAS, 2007).

A partir do tratamento dos dados coletados, Hablas (2007) apresenta que os resultados obtidos indicaram que o comprometimento da visibilidade teve impactos mínimos sobre a velocidade de fluxo livre, apresentando reduções na casa de 1 a 3% apenas para situações em que a visibilidade era abaixo de 1,2 km. Os gráficos da figura 6 ilustram os resultados encontrados para Minneapolis/St. Paul, onde foram observadas as maiores reduções na velocidade de fluxo livre.

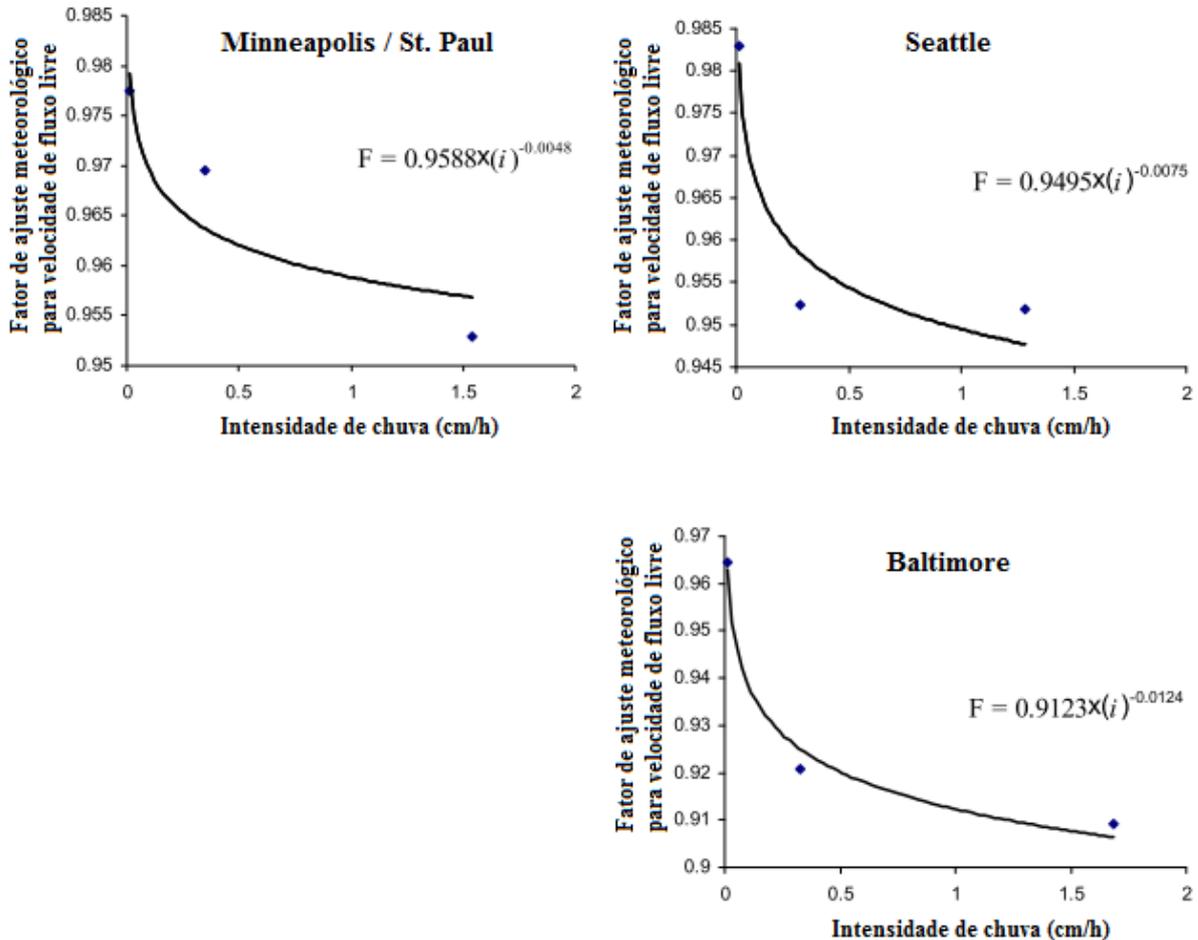
Figura 6 – Impacto da visibilidade na velocidade de fluxo livre para Minneapolis/St. Paul



(fonte: adaptado de HABLAS, 2007, p. 73)

Em relação à presença de chuva, Hablas (2007) aponta que, para ocorrências leves, as reduções na velocidade de fluxo livre chegaram a 2,3%. Conforme a intensidade de chuva aumentou, a velocidade de fluxo livre continuou a cair, até alcançar uma redução máxima de 4,8% para intensidade de chuva de 1,5cm/h. Os gráficos da figura 7 mostram a variação do fator de ajuste meteorológico conforme a intensidade de chuva presente.

Figura 7 – Variação do fator de ajuste meteorológico para velocidade de fluxo livre em relação à intensidade de chuva



(fonte: adaptado de HABLAS, 2007, p. 37)

5.2 INFLUÊNCIA DA METEOROLOGIA NO DESEMPENHO DO TRÁFEGO: ESTUDO 2

Foi desenvolvido um estudo na Bélgica, com o intuito de analisar os efeitos das condições meteorológicas na intensidade do fluxo diário de tráfego, e investigar se a natureza da via e sua utilização interferem ou não na dimensão do impacto da meteorologia.

Segundo o artigo publicado por Cools et al. (2010), os dados relativos ao tráfego foram coletados a partir de detectores distribuídos ao longo da via, que faziam a contagem de carros e caminhões, velocidade média temporal de todos os veículos e indicavam a porcentagem de tempo em que os detectores estavam “ocupados” por veículos. Foram consideradas também as características dos dias ao longo do ano, atentando para a coleta de dados nos finais de semana, vésperas de feriados, feriados, época de férias e etc. Já os dados relativos à

meteorologia foram obtidos através de estações meteorológicas automáticas localizadas próximas aos pontos de estudo, e equipadas com sensor climático, tetômetro, anemômetro, sensor de temperatura, hidrômetro e pluviômetros.

Em relação aos resultados, os autores indicam que a ocorrência de precipitações, nebulosidade e velocidade do vento são correlacionadas de forma negativa com a intensidade de tráfego observada, ao passo que boas condições de tempo são positivamente correlacionadas. A tabela 2 faz uma comparação entre as categorias de indicadores de fenômenos meteorológicos, onde se observa uma ambiguidade no comportamento do tráfego em relação à presença de granizo, neblina e tempestade. Em alguns locais do estudo, a intensidade do tráfego aumentou com a ocorrência desses fenômenos, enquanto em outras localidades, observou-se a diminuição da intensidade de tráfego.

Tabela 2 – Mudança média na intensidade de tráfego na presença de condições meteorológicas adversas

Condições Meteorológicas	Jusante Hasselt	Montante Hasselt	Jusante Bruxelas	Montante Bruxelas	Jusante Costa	Montante Costa
Granizo	2,58%	1,61%	6,91%	6,72%	-10,72%	-11,38%
Tempestade	3,61%	2,81%	-2,54%	-1,64%	3,73%	4,53%
Neve	-6,69%	-7,26%	-4,29%	-5,83%	-14,33%	-15,54%
Visib. Reduzida	-3,99%	-2,56%	-6,17%	-7,44%	3,87%	3,46%

(fonte: adaptado de COOLS et al., 2010, p. 65)

Os autores também apontam que a diminuição da intensidade de tráfego em situações de chuva pode ser explicada pela diminuição da capacidade da rede viária, causada pela redução da velocidade, enquanto o aumento na situação de granizo pode ser atribuído ao fato das pessoas optarem por esse tipo de modal em situações climáticas desfavoráveis.

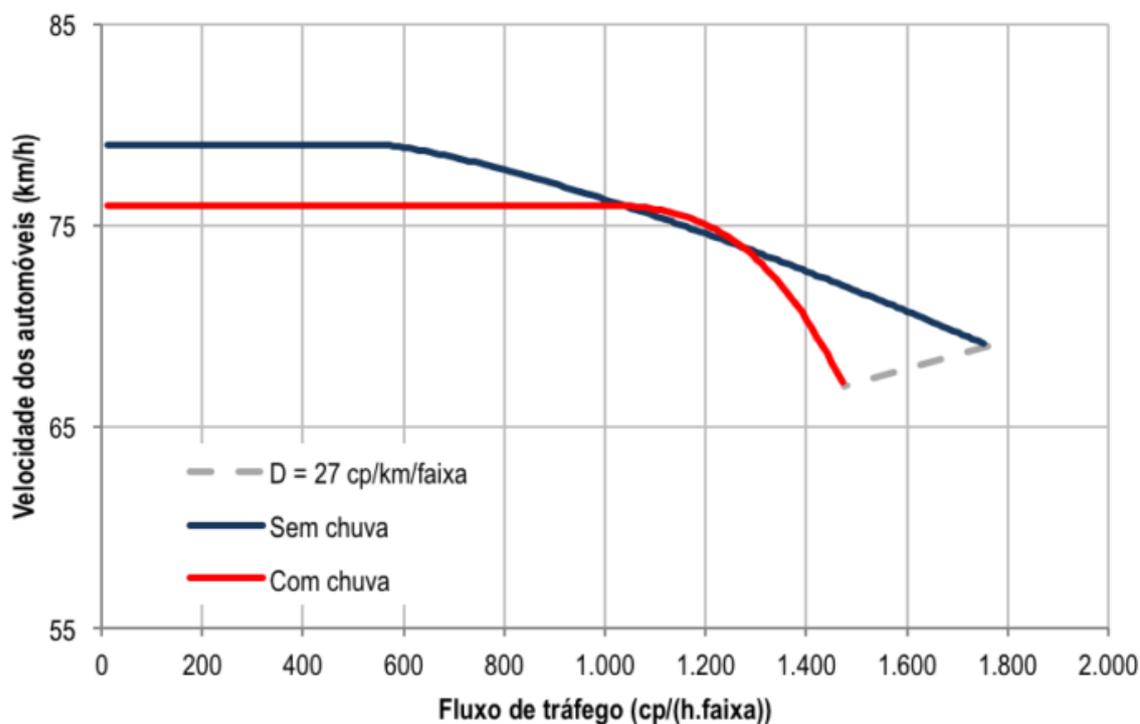
5.3 INFLUÊNCIA DA METEOROLOGIA NO DESEMPENHO DO TRÁFEGO: ESTUDO 3

Aqui no Brasil, uma pesquisa produziu um banco de dados para as rodovias Castelo Branco (SP-280), Raposo Tavares (SP-270), Rodoanel (SP-021) e Bandeirantes (SP-348), com o objetivo de estudar os efeitos das condições meteorológicas no fluxo de veículos dessas rodovias.

Segundo Pizzol et al. (2013), a coleta de dados de tráfego foi feita através das empresas ARTESP (Agência Reguladora de Serviços Públicos Delegados de Transporte do Estado de São Paulo) e CCR (Companhia de Concessões Rodoviárias), a partir de sensores localizados nas faixas mais à esquerda da rodovia, em que a presença de veículos pesados é baixa. Em relação à meteorologia, o IPMet/UNESP (Instituto de Pesquisas Meteorológicas/Universidade Estadual Paulista) forneceu imagens de satélite, das quais foram determinadas as condições do tempo (bom ou chuvoso), para os locais de estudo, através da decodificação dos pixels das imagens.

Os dados de fluxo e velocidade dos veículos foram cruzados com os dados da meteorologia e, conforme descrito por Pizzol et al. (2013), foi possível relacionar o fluxo de veículos e a velocidade para situações de tempo bom e de chuva. O gráfico da figura 8 ilustra o exemplo da Rodovia Castelo Branco.

Figura 8 – Relação entre fluxo e velocidade da Rodovia Castelo Branco



(fonte: PIZZOL et al., 2013)

Segundo os autores, foi possível observar que o *break point* do gráfico, ponto em que se tem o valor do fluxo de tráfego a partir do qual a velocidade começa a diminuir, é diferente para condições de tempo bom e condições de chuva. Na presença de chuva, o *break point* é maior do que na situação sem chuva, o que pode ser explicado pelo fato de que, nessa situação, a velocidade dos veículos já é reduzida e, portanto, requer um fluxo maior de veículos para diminuir ainda mais a velocidade. Quando não há presença de chuva, os condutores assumem velocidades maiores, e o comportamento da velocidade se torna mais sensível a pequenos aumentos no fluxo de tráfego.

Ainda, indicam que foi observada uma redução na velocidade de fluxo livre de 79 km/h, em dias de tempo bom, para 76 km/h, em dias de chuva; uma redução na capacidade da via, que passou de 1760 cp/h/faixa, em dias de tempo bom, a 1474 cp/h/faixa na presença de chuva; e uma redução da velocidade na capacidade de 69 km/h, em dias de tempo bom, para 67 km/h, em dias de chuva. Em alguns casos, a velocidade na capacidade se apresentou maior em dias de chuva, se comparado com dias de tempo bom. Isso pode ser explicado pelo fato de com a incidência de chuva, o fluxo de veículos na capacidade é menor, possibilitando aos condutores o desenvolvimento de velocidades um pouco maiores, quando desejado.

A partir das análises apresentadas pelos estudos mencionados, fica claro que as condições climáticas afetam o desempenho da via. Embora as metodologias tradicionais de avaliação do desempenho do tráfego não levem em consideração situações meteorológicas adversas, ter uma estimativa da variação do comportamento do tráfego em determinadas situações pode servir de auxílio e trazer melhorias no gerenciamento do sistema viário como um todo.

6 OBTENÇÃO DE DADOS

Para a análise do desempenho do tráfego no trecho estudado, foram utilizados dois tipos de dados: os que geram informações relacionadas ao tráfego de veículos e os que se referem às condições meteorológicas.

Nos próximos itens, serão discutidos os métodos de coleta de dados utilizados para o trabalho.

6.1 DADOS DO TRÁFEGO

As informações do tráfego de veículos que foram utilizadas para o estudo proposto foram obtidas por meio da Concepa, empresa que administra o trecho da Rodovia BR/290/RS entre os municípios de Osório e Porto Alegre. A Concepa possui detectores instalados ao longo do percurso, que fazem a contagem de veículos e que captam informações do tráfego.

Esses dispositivos consistem em laços indutivos, que oscilam em uma determinada frequência. Quando um veículo passa pelo laço, a sua indutância diminui e a frequência de oscilação aumenta, fazendo com que um pulso elétrico seja enviado para um dispositivo controlador, indicando a presença de um veículo. Os dados captados pelos detectores de circuito indutivo dizem respeito à passagem de veículos, presença, contagem e ocupação. Embora a velocidade não seja um parâmetro obtido de forma direta, ela pode ser mensurada a partir do comprimento médio do veículo e tempo de passagem sobre o detector. (FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION'S (FHWA) INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS PROGRAM OFFICE, 2007).

No km 96 da Rodovia BR/290/RS, sentido interior-capital, a empresa concessionária possui quatro detectores instalados na pista, um para cada faixa de tráfego. Para o estudo, foram utilizados os dados que dizem respeito à velocidade e fluxo de veículos de cada faixa, obtidos durante um período de aproximadamente três meses, entre abril e julho de 2013. Os dados brutos, obtidos do banco virtual da Concepa, trazem informações sobre cada veículo que passa sobre os indutores instalados nas faixas. Os dados utilizados foram agregados em intervalos de cinco minutos, de forma que a velocidade representa a média aritmética das

velocidades captadas durante cada intervalo, e o fluxo de tráfego o somatório dos veículos que passaram pela via a cada intervalo, extrapolado para uma hora.

6.2 DADOS METEOROLÓGICOS

As condições meteorológicas presentes no intervalo de tempo e espaço para o qual foi feita a análise do desempenho do tráfego foram obtidas através da Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica (REDEMET). A REDEMET possui estações meteorológicas espalhadas pelo Brasil, as quais emitem boletins meteorológicos voltados à aviação civil e militar. Na cidade e região metropolitana de Porto Alegre, a instituição possui uma estação meteorológica localizada na Base Aérea de Canoas, e outra localizada no Aeroporto Internacional Salgado Filho. Em detrimento da confiabilidade e qualidade dos dados referentes à meteorologia estarem restritas a um pequeno raio de alcance, optou-se por utilizar os dados da estação do Aeroporto Internacional Salgado Filho por ser a mais próxima da fonte de dados referente ao fluxo de tráfego da BR/290/RS, estando a uma distância de aproximadamente 3,2 km dos dispositivos citados. Para o estudo, foram abortadas três situações: períodos de tempo seco e aberto, períodos em que se apresentam condições de chuva e períodos em que se apresentam condições de neblina.

Os dados referentes à presença de chuva no local de estudo foram considerados conforme bandas de intensidade pré-estabelecidas. Adotando-se os critérios do Comando da Aeronáutica (BRASIL, 2010), a classificação das precipitações observadas é dada como apresentado nos quadros 1 e 2:

Quadro 1 – Intensidade de chuva

Intensidade	Acúmulo
Leve	de traços (T) até 2,4 mm/h (0,04 mm/min)
Moderada	de 2,5 a 9,9 mm/h (0,05 a 0,16 mm/min)
Forte	acima de 9,9 mm/h (0,16 mm/min)

(fonte: BRASIL, 2010, p. 46)

Quadro 2 – Intensidade de chuvisco

Intensidade	Acúmulo	Visibilidade
Leve	de traços (T) a 0,09 mm/h	maior que 1.000 m
Moderada	de 0,1 a 0,4 mm/h	entre 500 e 1.000 m (inclusive)
Forte	acima de 0,4 mm/h	menor que 500 m

(fonte: BRASIL, 2010, p. 46)

Em relação à presença de neblina, foram utilizados critérios de níveis de visibilidade para identificar a presença e intensidade de neblina no local de estudo. Segundo o Comando da Aeronáutica (BRASIL, 2010):

Visibilidade [...] é definida como a maior distância em que um objeto de dimensões apropriadas pode ser visto e identificado, quando observado de encontro a um fundo brilhante; ou a maior distância em que luzes na vizinhança podem ser vistas e identificadas, quando observadas de encontro a um fundo escurecido.

Em seus boletins meteorológicos, a REDEMET informa a visibilidade horizontal em intervalos que variam conforme o incremento no alcance da visibilidade, conforme descritos a seguir:

- a) incrementos de 50 m até o valor de 800 m;
- b) incrementos de 100 m para valores de 800 a 5.000 m;
- c) incrementos de 1.000 m para valores de 5.000 a 9.000 m; e (NR) – Portaria DECEA Nº 62/SDOP, de 05 de novembro de 2010.
- d) 9999 para indicar 10 km ou mais.

Na análise dos dados, caracterizou-se o ambiente sob condição de neblina as situações em que se apresentou um nível de visibilidade horizontal com distâncias menores ou iguais à 500 metros.

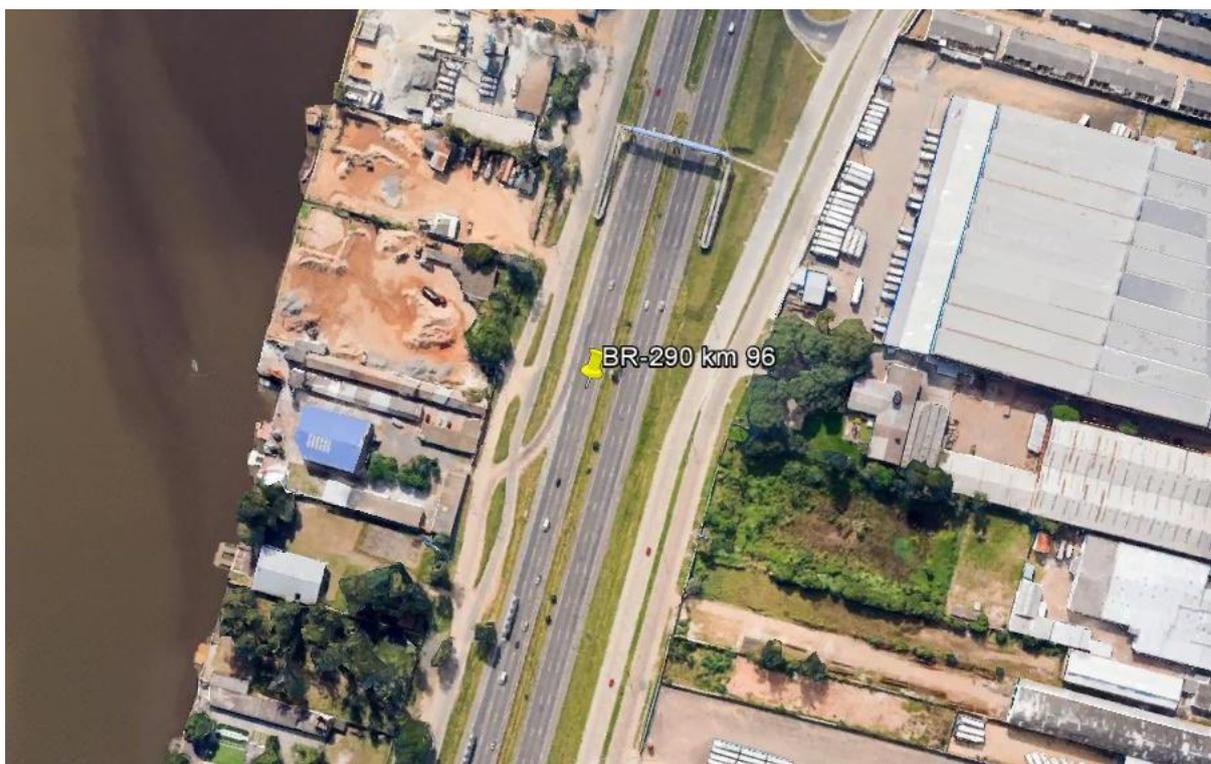
A REDEMET emite boletins com informações meteorológicas de hora em hora, com chamadas extras a cada mudança de comportamento do tempo. Para cada dado agregado de fluxo e velocidade dos veículos, foram correlacionadas, a partir dos boletins meteorológicos, a incidência ou não de precipitação e a visibilidade horizontal correspondente.

7 CARACTERIZAÇÃO DO TRECHO EM ESTUDO

O trecho da rodovia BR/290/RS conhecido como *Free Way* foi inaugurado no ano de 1973 com o objetivo de ligar a capital Porto Alegre à Rodovia BR-101 e ao litoral norte do Rio Grande do Sul. Na época de sua inauguração, a primeira autoestrada brasileira era composta por duas pistas de sentidos opostos, separadas por um canteiro central, duas faixas de rolamento por sentido e operava com velocidade máxima permitida de 120 km/h. Em 1994, o Governo Federal criou o Programa de Concessão Rodoviária, no qual a *Free Way* foi incluída, e a partir do reinício das cobranças de pedágio, o trecho sofreu algumas modificações de traçado e melhorias ao longo de sua extensão (CANABARRO JÚNIOR, 2013). No ano de 1997, a empresa Concepa assumiu a concessão do trecho.

O trecho em estudo é classificado como uma rodovia de Classe 0, que segundo o Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem (1991) corresponde a: “via expressa, do mais elevado padrão técnico, com controle total de acesso”. A figura 9 indica a localização do km 96 da BR/290/RS, onde estão instalados os dispositivos que captam os dados referentes ao tráfego, e a figura 10 mostra a distância entre os pontos de captação dos dados de tráfego e dos dados meteorológicos, localizado no Aeroporto Internacional Salgado Filho. A distância linear entre os dois pontos é de aproximadamente 3,2 km.

Figura 9 – Indicação da localização do km 96 da BR/290/RS



(fonte: adaptado do GOOGLE EARTH, 2015)

Figura10 – Indicação da distância entre o ponto de captação dos dados de tráfego e o ponto de captação dos dados meteorológicos



(fonte: adaptado de GOOGLE EARTH, 2015)

Segundo o relatório anual da Agência Nacional de Transportes Terrestres (2014) de 2013, no intervalo de tempo do estudo, o km 96 era composto por pista dupla, com três faixas por sentido, e apresentava velocidade máxima permitida para veículos leves de 100 km/h e operação em nível de serviço F. A tabela 3 traz informações das características operacionais do segmento em estudo no ano de 2013.

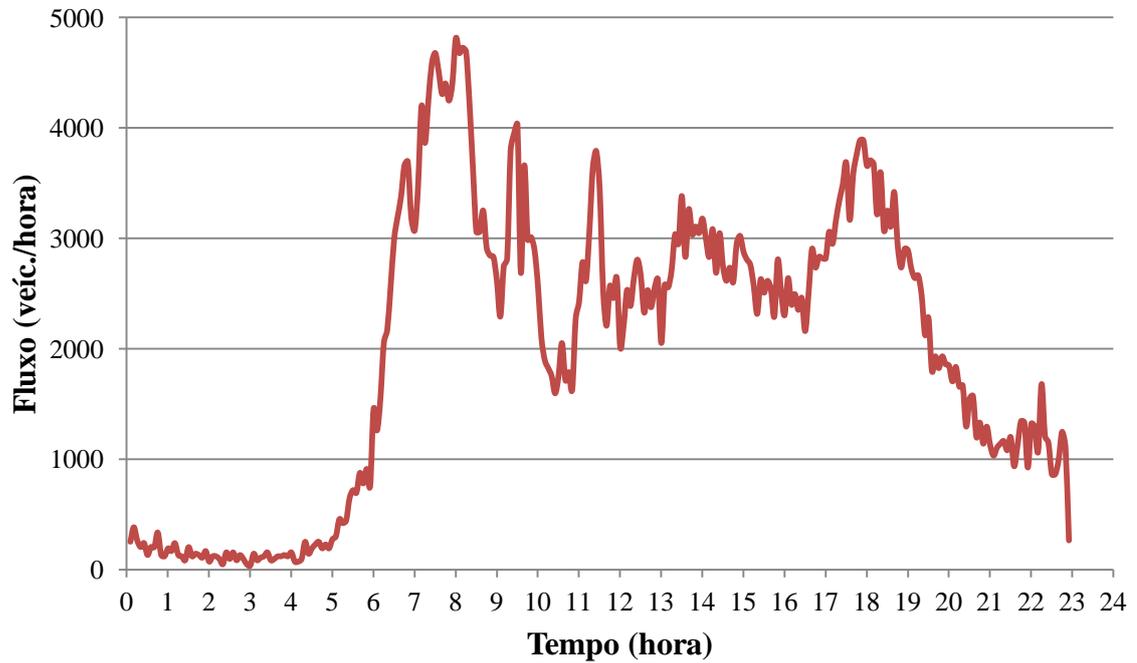
Tabela 3 – Características operacionais do trecho em estudo

Subtrecho	Faixa de Domínio	Classe da Rodovia	Canteiro Central	Número de Faixas por Sentido	Velocidade Máxima - Veíc. Leves	Raio Mínimo Horizont	Rampa Máxima
trecho 7	120 m	0	5 m	3	100 km/h	859 m	3%

(fonte: adaptado de ANTT, 2014, p. 100)

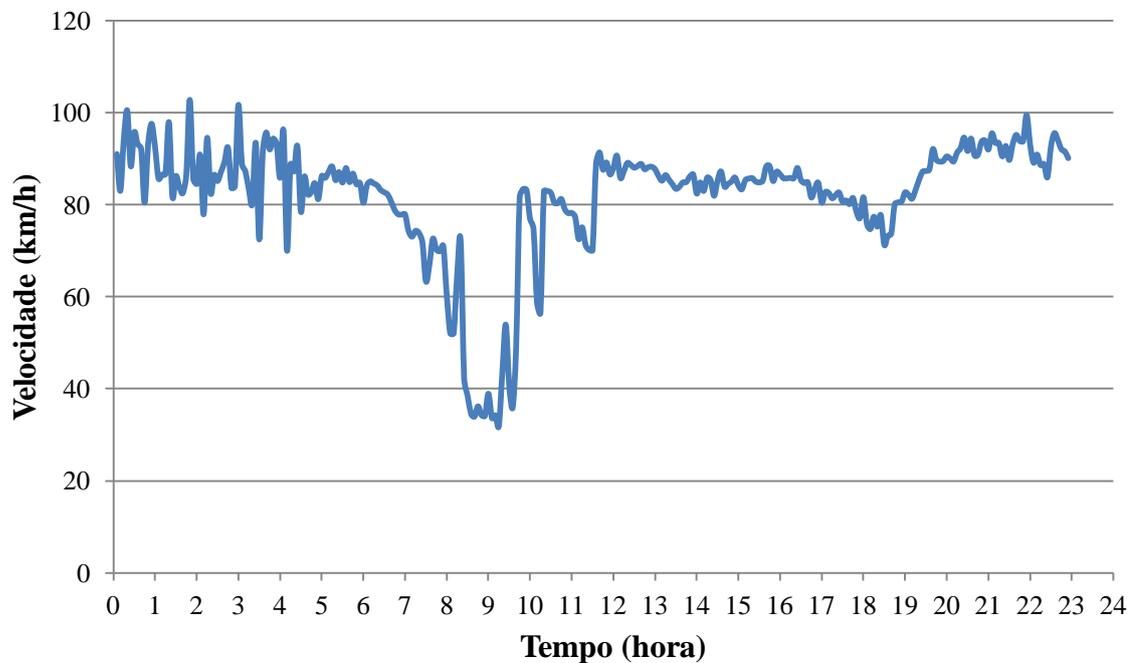
Além de ligar Porto Alegre ao litoral norte do Rio Grande do Sul, a *Free Way* também compõe um importante elo entre a capital e região metropolitana. O crescimento de Porto Alegre e a expansão metropolitana, juntamente com o crescimento industrial, populacional e comercial nas regiões periféricas resultou num aumento do deslocamento diário de pessoas das cidades vizinhas como Cachoeirinha, Gravataí, Viamão e Alvorada ao centro de Porto Alegre. Esse deslocamento diário, que utiliza também parte da *Free Way* como rota, contribui para os congestionamentos e alto volume de veículos registrados no horário de pico. A exemplo, os gráficos das figuras 11 e 12 mostram o comportamento do tráfego registrado ao longo do dia 08 de maio de 2013, um dia típico de semana sem incidência de chuva ou neblina. Os gráficos indicam a evolução da velocidade e fluxo de veículos ao longo de 24 horas.

Figura 11 – Comportamento do fluxo de veículos no km 96 da BR/290/RS ao longo do dia 08 de maio de 2013



(fonte: elaborado pela autora)

Figura 12 – Comportamento da velocidade dos veículos no km 96 da BR/290/RS ao longo do dia 08 de maio de 2013



(fonte: elaborado pela autora)

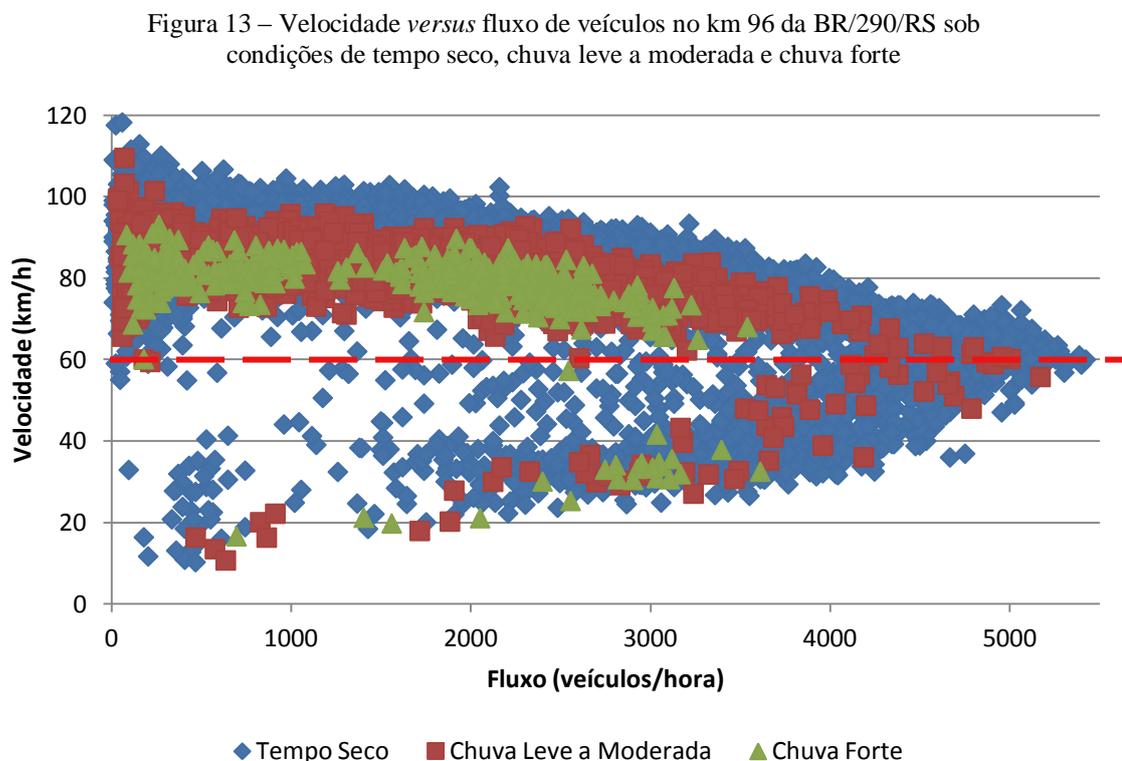
Por estar inserido em uma região metropolitana, o tráfego do trecho em estudo apresenta características diferentes dos trechos rurais. É aparente que nos horários de pico há um aumento do fluxo de veículos e conseqüente queda da velocidade. No intervalo de pico da manhã – das 06h e 30 min às 10h –, o fluxo de veículos chega próximo a 5.000 veíc./h, ao passo que a velocidade apresenta valores abaixo de 40 km/h. O grande volume de veículos acaba interferindo no desempenho da via, já que o fluxo de tráfego intenso implica na redução de movimentos de manobra e na redução da capacidade de absorção de perturbações pelo sistema. Da mesma forma, fenômenos meteorológicos também influenciam no desempenho do tráfego. Os resultados da análise do comportamento do tráfego sob incidência de chuva e neblina serão discutidos no próximo capítulo.

8 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir da associação do banco de dados referente à velocidade e fluxo dos veículos com as condições climáticas presentes, pôde-se analisar o comportamento do tráfego do km 96 da BR/290/RS. Foram avaliados os impactos na velocidade e no fluxo de tráfego sob condições de chuva leve a moderada, chuva forte, neblina, e influência no nível de serviço observado em decorrência dos fenômenos meteorológicos presentes.

8.1 INFLUÊNCIA DA INCIDÊNCIA DE CHUVA

O gráfico da figura 13 mostra uma sobreposição da relação entre velocidade e fluxo de veículos para o cenário em que não havia incidência de precipitação, cenário com incidência de chuva leve a moderada e cenário com incidência de chuva forte.



(fonte: elaborado pela autora)

A curva projetada pela legenda em azul representa os dados de fluxo de tráfego e velocidade captados em intervalos de tempo com tempo seco, ao passo que a curva projetada pela legenda em vermelho representa os dados de tráfego captados em intervalos com incidência de chuva leve a moderada – precipitação de até 9,9 mm/h – e a curva projetada pela legenda em verde representa os dados captados em intervalos com incidência de chuva forte – precipitação acima de 9,9 mm/h –. Estipulando-se que os pontos com velocidade acima de 60 km/h sejam representativos da parte superior do gráfico e que os pontos com velocidade abaixo de 60 km/h sejam representativos da parte inferior, percebe-se qualitativamente que, principalmente na parte superior, onde ainda não ocorreu o colapso da corrente de tráfego, as velocidades apresentadas pelas curvas com incidência de chuva leve a moderada e chuva forte são menores do que as velocidades apresentadas pela curva de tempo seco. As médias de velocidades para cada cenário, antes e depois do colapso da corrente de tráfego, são apresentadas na tabela 4.

Tabela 4 – Velocidade média dos veículos antes e depois do colapso da corrente de tráfego sob condições de tempo seco, chuva leve a moderada e chuva forte

	Velocidade média dos veículos antes do colapso do tráfego	Velocidade média dos veículos depois do colapso do tráfego
Tempo seco	86,84 km/h	42,59 km/h
Chuva leve a moderada	82,01 km/h	39,70 km/h
Chuva forte	79,91 km/h	31,78 km/h

(fonte: elaborado pela autora)

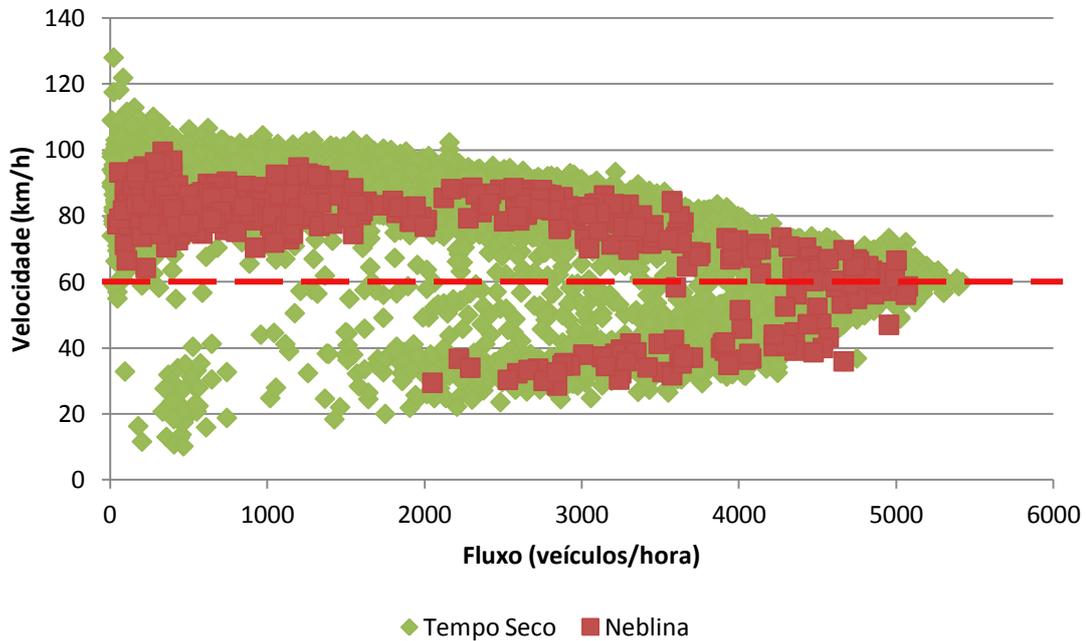
Em relação ao braço superior da curva fluxo-velocidade, a queda da velocidade comparando-se as médias obtidas no cenário de tempo seco e no cenário de chuva leve a moderada, é de aproximadamente 5,5%, enquanto a queda observada comparando-se as médias obtidas no cenário de tempo seco e no cenário de chuva pesada chega a 8%. Tanto para precipitações leves quanto para fortes, a queda da velocidade média foi superior contrapondo-se aos estudos 1 e 3 da literatura discutidos anteriormente, nos quais esse valor girou em torno de 4%, mas ficou próxima da queda média sugerida pelo *Highway Capacity Manual*. As quedas mais bruscas das velocidades médias são observadas na parte inferior da curva fluxo-velocidade, após o colapso da corrente de tráfego. Comparando-se as médias obtidas com tempo seco e chuva leve a moderada, observa-se uma queda de aproximadamente 8%, ao passo que a queda observada comparando-se tempo seco e chuva forte é de 25,4%.

Analisando o *breakdown* – ponto em que acontece o colapso da corrente de tráfego – do gráfico sob a ótica do fluxo de veículos, observa-se que tanto para dados com cenário de tempo bom quanto para cenário com incidência de chuva leve a moderada, o fluxo máximo comportado pela via gira em torno de 5.000 veíc./hora. Em contrapartida, para cenário de chuva forte, o fluxo máximo comportado pela via no limite do *breakdown* é próximo a 3.600 veíc./hora. Essa redução no fluxo de tráfego observada, correspondente a aproximadamente 30%, pode ser explicada pelo fato de que os motoristas, sob condições de chuva forte, tendem a adotar posturas mais conservadoras. O comprometimento da visibilidade em função do volume de precipitação, bem como as condições de pista molhada ou com acúmulo de lâmina d'água na pista acabam inibindo o desenvolvimento de velocidades mais altas. Ao passo que o fluxo de veículos aumenta, o espaço livre para manobras passa a ficar mais restrito, e somado aos efeitos negativos da forte precipitação, a corrente de tráfego passa a desenvolver velocidades mais baixas, deslocando o *breakdown* da curva para fluxos menores.

8.2 INFLUÊNCIA DA INCIDÊNCIA DE NEBLINA

O gráfico da figura 14 mostra uma sobreposição da relação entre velocidade e fluxo de veículos para o cenário em que foram registradas distâncias de visibilidade horizontal maiores que 500 m e cenário em que foram registradas menores que 500 m, caracterizando a condição de neblina.

Figura 14 – Velocidade *versus* fluxo de veículos no km 96 da BR/290/RS com e sem incidência de neblina



(fonte: elaborado pela autora)

A curva projetada pela legenda verde corresponde aos dados em que a distância de visibilidade horizontal é maior de 500 m, ao passo que a curva projetada pela legenda vermelha corresponde aos dados em que essa distância é menor que 500 m. Diferentemente dos resultados encontrados em relação à incidência de chuva forte, o comportamento do fluxo de tráfego em ambas as situações tende a ser mais homogêneo. A tabela 5 mostra as velocidades médias obtidas com e sem incidência de neblina, tanto para a parte superior quanto para a inferior do gráfico.

Tabela 5 – Velocidade média dos veículos antes e depois do colapso da corrente de tráfego com e sem incidência de neblina

	Velocidade média dos veículos antes do colapso do tráfego	Velocidade média dos veículos depois do colapso do tráfego
Sem incidência de neblina	86,84 km/h	42,59 km/h
Com incidência de neblina	81,41 km/h	42,23 km/h

(fonte: elaborado pela autora)

Embora o braço superior da curva fluxo-velocidade apresente uma queda de aproximadamente 6,25% na velocidade média da corrente de tráfego comparando-se os cenários com e sem neblina, essa queda passa a ser quase insignificante quando se observa o

braço inferior da curva do gráfico. Para velocidades abaixo de 60 km/h, a queda da velocidade média sob condição de neblina não chega a 1%. Para o km 96 da BR/290/RS, o comprometimento da visibilidade mostrou um impacto bem menor sobre a velocidade média da corrente de tráfego se comparado com a incidência de chuvas, assim como já observado no estudo proposto por Hablas (2007), discutido no capítulo 5.

O quadro 3 traz um resumo dos impactos das condições meteorológicas sobre a velocidade e capacidade da corrente de tráfego encontrados a partir do estudo proposto comparativamente aos citados pela literatura.

Quadro 3 – Impactos das condições meteorológicas sobre a velocidade média da corrente de tráfego e capacidade da via

Parâmetros Estudos	Highway Capacity	Estudo 1	Estudo 3	BR/290/RS km 96
Percentual de redução na velocidade de fluxo livre devido à chuva leve	7,90%	2,3%	3,8%	5,5%
Percentual de redução na velocidade de fluxo livre devido à chuva forte	14,60%	4,8%		8,0%
Percentual de redução na velocidade média na capacidade à chuva leve	13,70%	-	2,9%	8,0%
Percentual de redução na velocidade média na capacidade à chuva forte	16,80%	-		25,4%
Percentual de redução na velocidade média devido à neblina	-	1,0 a 3,0%	-	1,0 a 6,25%
Percentual de redução na capacidade devido à presença de chuva	14 a 15%	-	16,25%	30,0%

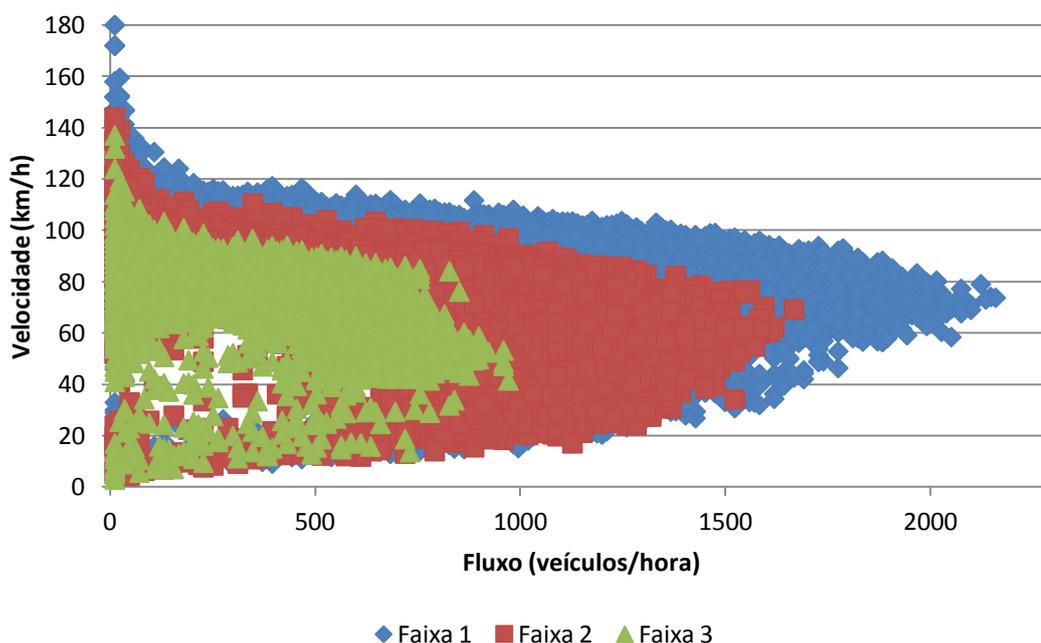
(fonte: elaborado pela autora)

8.3 IMPACTOS NO NÍVEL DE SERVIÇO

Nos subitens 9.1 e 9.2 discutidos anteriormente, os dados referentes à velocidade e fluxo de veículos foram agrupados de forma a considerar a corrente de tráfego como um todo; de forma homogênea. Contudo, no trecho do km 96 da BR/290/RS, observa-se uma distinção entre as características dos fluxos que trafegam em cada faixa da rodovia. A faixa mais à direita da pista, por exemplo, tende a comportar em sua maioria veículos de carga, os quais desenvolvem velocidades mais baixas, enquanto a faixa mais à esquerda tende a comportar em sua maioria veículos leves, que desenvolvem velocidades mais altas. A metodologia de

análise do nível de serviço para *free ways*, proposta pelo *Highway Capacity Manual*, não pode ser diretamente aplicada nas rodovias brasileiras, já que estas não apresentam o padrão comportamental considerado para o desenvolvimento do método. A figura 15 mostra a diferença no padrão comportamental da corrente de tráfego do km 96 da BR/290/RS, de acordo com cada faixa da rodovia.

Figura 15 – Comportamento da corrente de tráfego nas diferentes faixas do km 96 da BR/290/RS



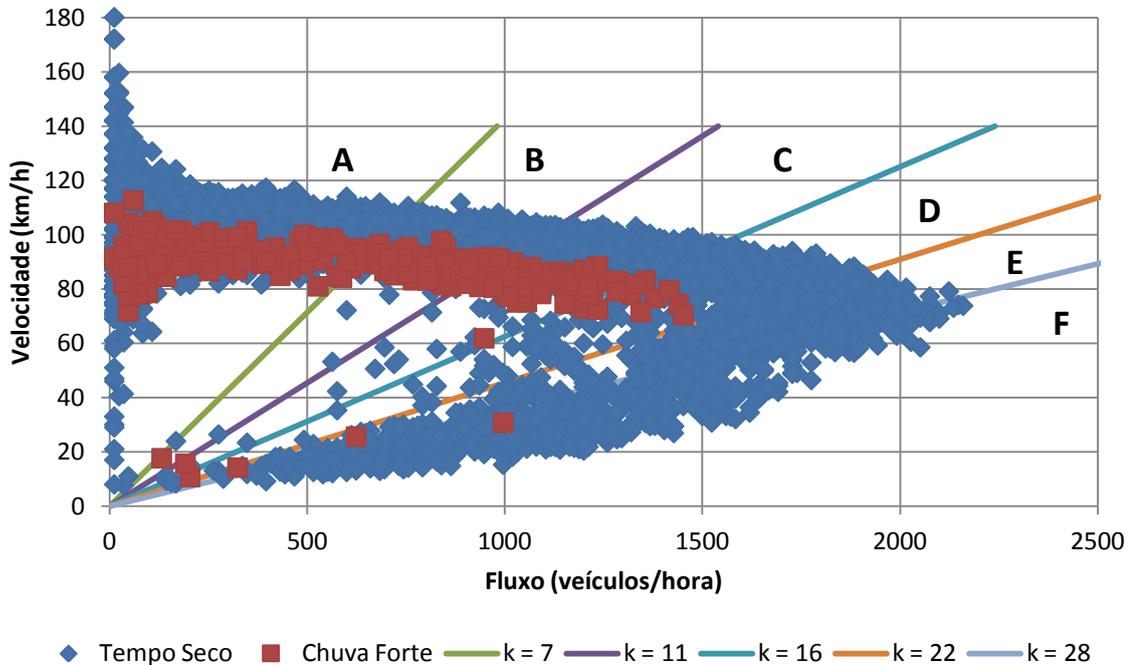
(fonte: elaborado pela autora)

A curva projetada em azul representa a relação fluxo-velocidade da corrente de tráfego da faixa mais à esquerda da pista, ao passo que a curva projetada em vermelho representa a faixa do meio, e a curva projetada em verde representa a faixa mais à direita. Qualitativamente, percebe-se uma diferença expressiva no fluxo de veículos que denota a capacidade de cada faixa, e que o *breakdown* do gráfico acontece para fluxos menores nas faixas 2 e 3, nas quais se tem um volume maior de tráfego de veículos pesados.

Mesmo que a rodovia apresente um comportamento heterogêneo entre suas faixas de tráfego, e diferente daquele considerado para o desenvolvimento do método de análise do nível de serviço da via proposto pelo *Highway Capacity Manual*, a faixa mais à esquerda se aproxima do comportamento das *free ways* a que o Manual se baseia. Dessa forma, para fins didáticos, o nível de serviço da faixa 1 foi analisado. A figura 16 mostra a relação fluxo-velocidade da

faixa 1, sob condições de tempo bom e chuva forte, indicando também os limites de densidade que caracterizam cada nível de serviço, conforme metodologia do *Highway Capacity Manual*.

Figura 16 – Relação fluxo-velocidade da faixa 1 do km 96 da BR/290/RS



(fonte: elaborado pela autora)

As retas do gráfico indicam o limite de densidade que define as banda de nível de serviço. Nota-se que, para a projeção da curva em azul, a qual representa tempo seco, o *breakdown* do gráfico fica muito próximo ao limite estabelecido pela densidade correspondente à 28 veículos/km, equivalente à fronteira entre os níveis de serviço E e F estabelecidos pelo *Highway Capacity Manual*. Isso reforça a ideia de que, para a faixa mais à esquerda, as características do tráfego são semelhantes às encontradas em uma *free way*. Entretanto, para a projeção da curva em vermelho, a qual representa um cenário com incidência de chuva forte, o *breakdown* acontece para um fluxo menor, próximo à densidade máxima de 22 veículos/km, equivalente à fronteira entre os níveis de serviço D e E. Sob influência de chuva forte, além da queda na velocidade média, a via diminui significativamente a sua capacidade. Ao passo que, com tempo seco a faixa apresenta um fluxo máximo de aproximadamente 2160 veíc./h, com incidência de chuva forte o fluxo máximo passa a ser de aproximadamente 1450 veíc./h, representando uma queda de quase 33% na capacidade. Esse comportamento, conforme previsto pelo *Highway Capacity Manual*, denota que, para manter o mesmo padrão de

qualidade e segurança, a via passa a comportar um fluxo de veículos menor e consequentemente acomodar um número menor de veículos por quilômetro.

Com a análise do nível de serviço apresentado pelo trecho em estudo, pôde-se reforçar a ideia de que as condições meteorológicas apresentam um impacto importante na corrente de tráfego. A alteração na velocidade média do fluxo de tráfego sob condições de chuva leve a moderada e chuva forte, sobretudo no regime de congestionamento em que as quedas chegaram à 8% e 25,4%, aponta o efeito negativo que a precipitação de chuva acarreta ao sistema. Da mesma forma, as quedas expressivas na capacidade da via, tanto na análise dos dados agregados de todas as faixas quanto na análise da faixa única, denotam que o sistema como um todo passa a ser mais sensível a possíveis perturbações na corrente de tráfego sob condições meteorológicas adversas, refletindo diretamente no desempenho operacional do sistema.

9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos na análise do estudo realizado mostram que condições meteorológicas adversas interferem no comportamento do tráfego de forma significativa. A queda da velocidade média causada pela incidência de chuva, tanto no regime de fluxo livre quanto no regime de congestionamento, ficou acima das médias relatadas pela literatura, salvo quando comparado aos estudos indicados pelo *Highway Capacity Manual*. A única exceção observada foi em relação à incidência de chuva forte em regime de congestionamento, onde se observa uma queda considerável de 25,4% no km 96 da BR/290/RS, 8,6% acima do percentual apresentado nos estudos do Manual. A geometria do trecho em estudo, as condições de uso do pavimento, a frota de veículos que compõe o tráfego e o próprio perfil do condutor podem ter influenciado nos resultados encontrados. Da mesma forma, a redução na capacidade da via em torno de 30%, observada no regime de congestionamento sob chuva forte, é expressiva e reflete diretamente no nível de serviço do sistema. Embora as médias encontradas em estudos anteriores apontem uma queda em torno de 15% na capacidade, pode-se atribuir esta disparidade às características do perfil do tráfego e ao próprio contexto no qual o trecho em estudo está inserido, posto que este segmento, já enquadrado em uma zona urbana, apresenta um comportamento não tão uniforme se comparado a um trecho de autoestrada rural descrito pelo *Highway Capacity Manual*. No que diz respeito à incidência de neblina, por mais que a queda da velocidade média no regime de congestionamento não tenha sido significativa, o seu comportamento em regime de fluxo livre aponta uma queda de aproximadamente 6,25%, resultado superior aos 5,5% observados sob condição de chuva leve a moderada.

Embora as características do trecho em estudo não se encaixem perfeitamente no padrão de rodovia de fluxo ininterrupto proposto pelo *Highway Capacity Manual*, pôde-se observar um comportamento equivalente em condições de tempo seco quando se levou em consideração apenas a faixa da esquerda do trecho, responsável por acomodar em sua maioria veículos leves – que desenvolvem velocidades médias maiores – e apresenta um comportamento mais homogêneo. Ainda, apresenta um número menor de manobras e já não sofre tanta influência dos acessos existentes ao longo da via. Contudo, a queda brusca e expressiva na capacidade

da via sob condições de chuva forte manteve-se, deslocando o colapso da corrente de tráfego para a região do gráfico entre os limites do nível de serviço D.

A partir das relações fluxo-velocidade obtidas, foi possível identificar um padrão comportamental da corrente de tráfego para cada cenário. Embora o estudo apresente limitações relevantes, como o mecanismo de obtenção dos dados meteorológicos – por ter validade restrita a pequenas distâncias –, os resultados obtidos mostram um pouco do impacto que situações meteorológicas adversas podem gerar na dinâmica de transportes. Com estudos mais aprofundados e que obtenham resultados mais apurados e representativos, é possível propor, por exemplo, fatores de ajustes e funções que descrevam o comportamento do fluxo de tráfego sob as diversas condições meteorológicas, como proposto por Hablas (2007) e Pizzol et al. (2013). Outras abordagens, como impactos nos custos e tempos no sistema de transportes, aliadas à análise de impacto nas velocidades médias e capacidade da via, podem servir como ferramenta importante no auxílio de estratégias para melhorias na gestão do tráfego, com objetivo de minimizar os efeitos decorrentes das condições adversas do tempo como aumento de congestionamentos, geração de filas, diminuição da velocidade de fluxo livre e aumento nos tempos de viagem. A exemplo, a utilização da ferramenta de gerenciamento ativo pode auxiliar na organização da corrente de tráfego também sob condições meteorológicas adversas, a partir das observações do comportamento do tráfego nessas condições. Agregando-se informações como condições presentes do pavimento sob incidência de chuva, possíveis ocorrências de acidentes e avarias no fluxo de tráfego, distribuição mais homogênea do tráfego entre as faixas de rolamento e velocidade máxima desejável, é possível alcançar um melhor desempenho do sistema como um todo.

REFERÊNCIAS

AGARWAL, M.; MAZE, T. H.; SOULEYRETTE, R. **Impacts of Weather on Urban Freeway Traffic Flow Characteristics and Facility Capacity**. Center of Transportation Research and Education. Iowa, 2005.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES. Rodovias Federais Concedidas: relatório da exploração de infraestrutura rodoviária. Brasília, DF, 2014. Disponível em: <http://www.antt.gov.br/index.php/content/view/4983/Relatorios_Anuais___Rodovias_Federais_Concedidas.html>. Acesso em: 30 ago. 2015.

BAZZAN, A. L. C.; KLÜGL, F. A Review on Agent-Based Technology for Traffic and Transportation. **The Knowledge Engineering Review**. [Cambridge, United Kingdom], v. 29, n. 3, p. 375-403, Jun. 2014. Disponível em: <<http://journals.cambridge.org/download.php?file=%2FKER%2FS0269888913000118a.pdf&code=f077ba065e79bd36be3d4e84592ebdd3>>. Acesso em: 17 nov. 2013.

_____. **Introduction to Intelligent Systems in Traffic and Transportation**. [San Rafael, CA]: Morgan & Claypool Publishers, [2014].

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G. da; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. 1 ed. (3. reimp.). Rio de Janeiro: Petrobras, Abeda, 2008 (reimp. 2010).

BIJLEVELD, F.; CHURCHILL, T. The Influence of Weather Conditions on Road Safety: An Assessment of the Effect of Precipitation and Temperature. **SWOV Institute for Road Safety Research**, Leidschendam, n. R-2009-9, p. 1-43, 2009.

BRASIL. Ministério da Defesa. Comando da Aeronáutica. Departamento de Controle do Espaço Aéreo. **Portaria DECEA n. 62/SDOP**, de 05 de novembro de 2010. Aprova a modificação ao manual que disciplina a organização e operação das estações meteorológicas de superfícies. Rio de Janeiro, 2010.

CANABARRO JÚNIOR, J.F. BR 290 Free Way: 40 anos de estrada. **Revista Estradas**, Porto Alegre, v. 12, n. 18, p. 76-82, Out. 2013. Disponível em: <<http://issuu.com/josefranciscocanabarrojunior/docs/re18>>. Acesso em: 19 set. 2015.

COOLS, M.; MOONS, E.; WETS, G. Assessing the Impact of Weather on Traffic Intensity. **Weather, Climate and Society**, Diepenbeek, Belgium, v. 2, p. 60-68, Jan. 2010. Disponível em: <<http://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/2009WCAS1014.1>>. Acesso em: 20 nov. 2014.

DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Normas de Projetos Rodoviários**, v. 1. Porto Alegre, 1991.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION'S (FHWA) INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS PROGRAM OFFICE. **A Summary of Vehicle Detection and Surveillance Technologies used in Intelligent Transportation Systems**. United States

of America, 2007. Disponível em:
<<https://www.fhwa.dot.gov/policyinformation/pubs/vdstits2007/vdstits2007.pdf>>. Acesso em:
14 dez. 2014.

GOODWIN, L. C. **Weather Impacts on Arterial Traffic Flow**. Mitretec System. Falls Church, Virginia, 2002.

GOOGLE EARTH. [Porto Alegre – Rio Grande do Sul]. [S.l.], 2015. Acesso em 1 outubro. 2015.

HABLAS, H. E. **A Study of Inclement Weather Impacts on Freeway Free-Flow Speed**. 2007. 112 f. Thesis (Master of Science in Civil and Environmental Engineering) – Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, 2007.

HOBBS, F. D. **Traffic Planning & Engineering**. Headington Hill Hall, Oxford: Pergamon Press Ltd., 1974.

MAY, A. D. **Traffic Flow Fundamentals**. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, 1990.

PIGNATARO, L. J. **Traffic Engineering: Theory and Practice**. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, 1973.

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. **Highway Capacity Manual**. Washington, DC, 2000.

_____. **Highway Capacity Manual**. Washington, DC, 2010. 3 v.

PIZZOL, B.; ANDRADE, G. R.; SETTI, J. R. Fusão de bancos de dados para estudo do efeito das condições meteorológicas no fluxo de veículos em rodovias paulistas. In: XXVII ANPET - Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, 2013, Belém, PA. **Anais do XXVII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes**. Rio de Janeiro, RJ: ANPET, 2013. Não paginado. Disponível em:
<http://www.anpet.org.br/ssat/interface/content/autor/trabalhos/publicacao/2013/150_AC.pdf>. Acesso em: 20 out. 2014.