



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES**

**SUED LACERDA COSTA**

**INFLUÊNCIA DA ADERÊNCIA PNEU-PAVIMENTO NOS CONFLITOS**  
**VEICULARES MICROSSIMULADOS**

**FORTALEZA**

**2017**

SUED LACERDA COSTA

INFLUÊNCIA DA ADERÊNCIA PNEU-PAVIMENTO NOS CONFLITOS VEICULARES  
MICROSSIMULADOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Transportes. Área de concentração: Planejamento e Operação de Sistemas de Transportes.

Orientador: Prof. Flávio José Craveiro Cunto, Ph.D.

Coorientadora: Profa. Verônica Teixeira Franco Castelo Branco, Ph.D.

FORTALEZA

2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

C875i Costa, Sued Lacerda.  
Influência da Aderência Pneu-Pavimento nos Conflitos Veiculares Microsimulados / Sued Lacerda Costa. – 2017.  
118 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Fortaleza, 2017.

Orientação: Prof. Dr. Flávio José Craveiro Cunto.

Coorientação: Profa. Dra. Verônica Teixeira Franco Castelo Branco.

1. Aderência Pneu-Pavimento. 2. Conflitos Veiculares. 3. Simulação Microscópica. I. Título.

CDD 388

---

SUED LACERDA COSTA

INFLUÊNCIA DA ADERÊNCIA PNEU-PAVIMENTO NOS CONFLITOS VEICULARES  
MICROSSIMULADOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Transportes. Área de concentração: Planejamento e Operação de Sistemas de Transportes.

Aprovada em: 23/11/2017.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Flávio José Craveiro Cunto, Ph.D. (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Profa. Verônica Teixeira Franco Castelo Branco, Ph.D. (Coorientadora)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Manoel Mendonça de Castro Neto, Ph.D. (Avaliador Interno)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Profa. Elisabete Fraga de Freitas, D.Sc. (Avaliadora Externa)  
Universidade do Minho (UMinho)

## AGRADECIMENTOS

Ao meu irmão, Yuri, que, ao longo de minha vida, sempre foi a voz da sensatez e da responsabilidade. Fundamental para a construção do meu caráter e para o amparo nas horas difíceis. Este trabalho tem um pouco da sua inteligência e da sua índole de sempre querer ajudar.

À Alana França, por ter estado ao meu lado, como uma rocha, durante a maior (e mais difícil) parte deste processo. Essencial para a manutenção da minha razão e do meu equilíbrio, principalmente por todas as vezes em que me mostrou o quanto eu era (e fui) capaz de concluir da melhor forma possível este trabalho. Talvez, algum dia, eu consiga expressar suficientemente minha gratidão.

Aos meus grandes e inseparáveis amigos, irmãos que a vida me deu há mais de década, Rafael, André, Leônidas e Deric. Meu clube que muito me ajudou de formas indiretas aqui, com amizade, lealdade, alegria, preocupação e torcida. Faltam até palavras para vocês, mas fica aqui meu singelo registro de gratidão por todos os momentos e pelos os demais que há por vir.

Aos meus igualmente grandes amigos, de longas datas, Caio César, Pedro Eduardo, Diego, Marcelino, Nathan, Carlos e Gustavo. Acompanharam também de perto todo processo, torcendo, oferecendo apoio e brindando o sucesso. Vocês foram fundamentais aqui, moçada!

Aos meus orientadores, prof. Flávio e profa. Verônica, que despertaram em mim a paixão pelos transportes. Grandiosos exemplos de comprometimento com a educação, sinto-me lisonjeado de ter tido a oportunidade de trabalhar com vocês. Ambos deixaram suas marcas em minha formação e, em todo o conjunto da ópera, sempre serei grato.

A todos os professores do PETRAN, em especial ao prof. Manoel, que tanto me ajudou com as análises estatísticas e que sempre deixou muito claro o quanto ama o que faz.

A todos meus colegas de PETRAN, muito em especial ao meu queridíssimo Franco. Todos os momentos de brincadeira e de trabalho estão aqui, muito bem guardados, e eu vou resumir em um “muito obrigado, Quinho”. Também, ao meu companheiro Dênnys, que trilhou comigo desde o princípio nesta jornada.

Aos meus amigos de trabalho do PAITT, que fazem com que o dia-a-dia seja tão mais leve.

À AMC pelo apoio na execução dos ensaios.

E à CNPq que financiou este projeto.

*“Even on a cloudy day,  
I’ll keep my eyes fixed on the sun”*

## RESUMO

A relação entre a Segurança Viária (SV) e a aderência pneu-pavimento é complexa, uma vez que não se compreende ao certo os efeitos da combinação do atrito e o comportamento dos condutores, especialmente em dias de chuva. Esta pesquisa buscou avaliar de que forma seria possível considerar a condição superficial de pavimentos no Desempenho da Segurança Viária (DSV). Propôs-se avaliar diferentes cenários em um ambiente tipicamente urbano de Fortaleza/CE, através da quantificação da SV por indicadores *proxy* de conflitos veiculares. Esta abordagem foi adotada a fim de implementar a ferramenta de simulação microscópica, com a qual se obtém maior quantidade de observações com registros da dinâmica dos veículos simulados. Pesquisa bibliográfica apontou a Velocidade de Fluxo Livre (VFL) e o Fluxo de Saturação (FS) como parâmetros-chave susceptíveis às variações da condição ambiental. Para avaliar a condição superficial, selecionou-se um trecho de via arterial típica de Fortaleza/CE e foram executados os ensaios de pêndulo britânico (ASTM E303-93, 2013) e de mancha de areia (ASTM E965, 2015). O método do *International Friction Index* (IFI), por sua vez, reportou ambos os parâmetros em atrito superficial, sendo utilizado para a determinação da frenagem máxima disponível (*Maximum Available Deceleration Rate*, MADR). Pela comparação de MADR com a frenagem necessária para evitar a colisão (*Deceleration Rate to Avoid the Crash*, DRAC), avaliou-se a severidade das interações veiculares. Esta pesquisa evidenciou que existe ajuste dos condutores em dias de chuva, resguardando maiores distâncias entre si, com redução média de 8% no FS. Este ajuste foi representado no VISSIM, através da calibração dos parâmetros de *car-following* W74. Resultado significativo da pesquisa apontou para a ocorrência de conflitos de maior severidade em situações de maior adversidade (4,3 vezes superior), ressaltando a importância do ajuste do condutor aos estímulos externos.

**Palavras-chave:** Aderência Pneu-Pavimento, Conflitos Veiculares, Simulação Microscópica.

## ABSTRACT

The relationship between Road Safety (RS) and road skid resistance is furtherly complex, since one cannot certainly comprehend the combined effects of friction and driving behavior, especially during rainy days. Therefore, this research aimed to assess how would it be possible to consider surface condition on Road Safety Performance (RSP). It was proposed to assess different scenarios in a typically Fortaleza, Brazil urban environment, through surrogate measures of safety. This approach was chosen based on the possibility of using a microscopic traffic simulator, with which is allowed to obtain a greater amount of detailed data with records of the dynamics of simulated vehicles. Literature review converged to Free-Flow Speed (FFS) and Saturation Flow (SF) as key parameters susceptible to adverse weather. To evaluate surface condition, it was selected a segment of a typical Fortaleza, Brazil arterial road to perform the British pendulum test (AST E303-93, 2013) and the sand patch test (ASTM E965, 2015). International Friction Index (IFI) reported both micro- and macrotecture in friction coefficient, which was used to determine Maximum Available Deceleration Rate (MADR). MADR was then compared to Deceleration Rate to Avoid the Crash (DRAC) to evaluate the severity of vehicular interactions. Thus, this research highlighted the existence of driving behavior adjustment due to precipitations, keeping a larger safety distance among each other, which led to an 8% SF reduction. This adjustment was represented on VISSIM, by a car-following W74 model calibration. Important result of this research pointed to the occurrence of more severe conflicts in situations of major adversity (4.3 times greater), emphasizing the importance of driving behavior adjustment due to external stimulus.

**Keywords:** Skid Resistance, Vehicular Conflicts, Microscopic Simulation.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Componentes da força de atrito (Andresen e Wambold, 1999) .....	20
Figura 2	– Níveis de microtextura e de macrotextura (Autor, 2017) .....	22
Figura 3	– Relação da taxa média de acidentes em vias molhadas e atrito superficial (Lindenmann, 2006) .....	31
Figura 4	– Pirâmide do <i>continuum</i> de segurança (Hydén, 1987) .....	36
Figura 5	– Conceito do <i>post-encroachment time</i> (Cunto, 2008) .....	37
Figura 6	– Distribuição da velocidade e do <i>headway</i> para variada intensidade de chuva (Billot <i>et al.</i> , 2009) .....	44
Figura 7	– Comparação do fluxo de saturação para as condições adversas avaliadas (Asamer <i>et al.</i> , 2011) .....	44
Figura 8	– Metodologia proposta .....	47
Figura 9	– Etapas metodológicas da determinação da velocidade de fluxo livre ....	51
Figura 10	– Caracterização de comportamento agressivo e cauteloso dos condutores .....	56
Figura 11	– Estados de conservação do pavimento considerados e detalhe do desgaste observado em campo .....	58
Figura 12	– Demarcação das trilhas de roda .....	58
Figura 13	– Função densidade da probabilidade do indicador MADR (Cunto, 2008)	65
Figura 14	– Localização das câmeras de videomonitoramento do CTAFOR utilizadas .....	66
Figura 15	– Focos (a) C11 Des. Moreira x Abolição e (b) C15 Virgílio Távora x Santos Dumont .....	67
Figura 16	– Focos (a) C18 Aguanambi x Dom. Olímpio e (b) C20 Sen. Pompeu x 13 de Maio .....	68
Figura 17	– Focos (a) C24 Universidade x 13 de Maio e (b) C22 Luciano Carneiro x 13 de Maio .....	68
Figura 18	– Focos (a) C24 Pe. Anchieta x Bezerra de Menezes e (b) C28 José Bastos x Carneiro Mendonça .....	68
Figura 19	– Focos (a) C32 Godofredo Maciel x Costa e Silva e (b) C33 Bernardo Manoel x Silas Munguba .....	69

Figura 20	–	Focos (a) C37 Des. Gonzaga x Oliveira Paiva e (b) C42 José Bastos x Gomes Brasil .....	69
Figura 21	–	Mapa da localização dos equipamentos de fiscalização eletrônica utilizados .....	71
Figura 22	–	Localização dos pares de fotossensores avaliados .....	72
Figura 23	–	<i>Boxplot</i> dos resultados de VFL por intensidade de precipitação .....	72
Figura 24	–	Frequência acumulada de VFL seco <i>versus</i> chuva do par FS 021-084 ...	74
Figura 25	–	Frequência acumulada de VFL seco <i>versus</i> chuva do par FS 069-120 ...	74
Figura 26	–	Frequência acumulada de VFL seco <i>versus</i> chuva do par FS 063-116 ...	74
Figura 27	–	Avaliação qualitativa da condição superficial do trecho de estudo .....	77
Figura 28	–	Definição adotada para interseção e meio de quadra .....	80
Figura 29	–	Classificação dos resultados de $F_{60}$ para trechos recapeados .....	82
Figura 30	–	Curvas de $\mu$ pela velocidade das condições superficiais avaliadas e obtidas por Costa <i>et al.</i> (2017) .....	83
Figura 31	–	Gráfico de frequência e de TTC médio para os tipos de conflito .....	87
Figura 32	–	Mapa de calor dos conflitos longitudinais para o cenário seco .....	89
Figura 33	–	Mapa de calor dos conflitos longitudinais para o cenário chuva e agressivo .....	90
Figura 34	–	Mapa de calor dos conflitos longitudinais para o cenário chuva e cauteloso .....	91
Figura 35	–	Frequência por classe de conflitos para os cenários avaliados .....	93
Figura 36	–	Curva de MADR pela velocidade por tipo veicular para $\mu = 0,75$ .....	94
Figura 37	–	Curva de MADR pela velocidade por tipo veicular para $\mu = 0,25$ .....	94
Figura 38	–	Obtenção do MADR a partir das características veiculares e da condição superficial .....	95
Figura 39	–	Valores médios de MADR por cenário avaliado .....	96
Figura 40	–	Análise das observações por cenário com $DRAC \geq MADR$ .....	97

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Limites dos domínios de variação superficial (ASTM E867-06, 2012) ..	21
Tabela 2	– Faixas de Classificação do F <sub>60</sub> Obtido pelo Método do IFI (Aps, 2006)	25
Tabela 3	– Redução do Fluxo de Saturação nas Condições Adversas Avaliadas (Asamer <i>et al.</i> , 2011) .....	44
Tabela 4	– Fluxo de Saturação e Atraso Inicial para Pavimento com Neve e Seco (Asamer <i>et al.</i> , 2013) .....	45
Tabela 5	– <i>Layout</i> do arquivo de dados gerados pelos fotossensores .....	50
Tabela 6	– Taxas de conversão adotadas por cruzamento .....	54
Tabela 7	– Quadro resumo de pontos ensaiados por características avaliadas .....	59
Tabela 8	– Classificação da (a) macrotextura (Aps, 2006) e da (b) microtextura (DNIT, 2006) .....	60
Tabela 9	– Classificação qualitativa do indicador DRAC (Hydén, 1996) .....	62
Tabela 10	– Quadro-resumo das variáveis constantes e dependentes do tipo veicular	64
Tabela 11	– Câmeras de videomonitoramento e movimentos avaliados .....	67
Tabela 12	– <i>Headway</i> de saturação ( $h_s$ ) das faixas avaliadas .....	70
Tabela 13	– <i>Headway</i> de saturação ( $h_s$ ) agrupado por movimento .....	71
Tabela 14	– Resultados de VFL para os níveis de intensidade de precipitação .....	72
Tabela 15	– Resultados de VFL para a condição seca <i>versus</i> chuva .....	73
Tabela 16	– Resultado da calibração dos parâmetros de <i>car-following</i> .....	75
Tabela 17	– Avaliação dos defeitos de superfície para o sentido norte-sul do trecho de estudo .....	76
Tabela 18	– Avaliação dos defeitos de superfície para o sentido sul-norte do trecho de estudo .....	76
Tabela 19	– Análise estatística descritiva para os trechos com recapeamento asfáltico .....	78
Tabela 20	– Análise estatística descritiva para os trechos com desgaste .....	78
Tabela 21	– Resultados da ANOVA fator único para as trilhas de roda .....	78
Tabela 22	– Análise estatística descritiva para os estados de conservação .....	79
Tabela 23	– Resultados da ANOVA fator único para os estados de conservação .....	80
Tabela 24	– Análise estatística descritiva para as características de operação viária .	81
Tabela 25	– Resultados do F <sub>60</sub> (IFI) para as condições superficiais avaliadas .....	81

Tabela 26	– Teste de aderência qui-quadrado para microtextura molhada ( $BPN_M$ ) ...	84
Tabela 27	– Teste de aderência qui-quadrado para microtextura seca ( $BPN_S$ ) .....	84
Tabela 28	– Teste de aderência qui-quadrado para macrotextura (HS) .....	84
Tabela 29	– Teste de aderência qui-quadrado para HS com distribuição gama .....	85
Tabela 30	– Resultados de frequência e de TTC dos conflitos do cenário seco .....	86
Tabela 31	– Resultados de frequência e de TTC dos conflitos do cenário com chuva e para condutor agressivo .....	86
Tabela 32	– Resultados de frequência e de TTC dos conflitos do cenário com chuva e para condutor cauteloso .....	86
Tabela 33	– Resultados do DRAC para os cenários avaliados .....	92
Tabela 34	– Constantes e variáveis adotadas para avaliar os impactos no MADR .....	93
Tabela 35	– Valores de MADR para os cenários avaliados .....	96
Tabela 36	– Valores de $p$ para os cenários avaliados .....	98

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

$\mu$	Coefficiente de Atrito
ANOVA	Análise de Variância
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
$ax$	Distância entre Veículos Parados em Fila
BPN	<i>British Pendulum Number</i>
$bx_{add}$	Fator Aditivo da Distância de Segurança entre Veículos em Movimento
$bx_{mult}$	Fator Multiplicativo da Distância de Segurança entre Veículos em Movimento
CTAFOR	Controle de Tráfego em Área de Fortaleza
CV	Coefficiente de Variação
DENATRAN	Departamento Nacional de Trânsito
DRAC	<i>Deceleration Rate to Avoid the Crash</i>
DSV	Desempenho da Segurança Viária
EP	Erro Percentual
$F_{60}$	Coefficiente de Atrito à Velocidade de 60 km/h
FS	Fluxo de Saturação
Funceme	Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos
HCM	<i>Highway Capacity Manual</i>
HS	<i>Hight of Sand</i>
$h_s$	<i>Headway</i> de Saturação
IFI	<i>International Friction Index</i>
PCD	Plataforma de Coleta de Dados da Funceme
PET	<i>Post-Encroachment Time</i>
$S_p$	Constante de Referência da Velocidade
SSAM	<i>Surrogate Safety Assessment Model</i>
SV	Segurança Viária
TLC	Teorema do Limite Central
TR	Trilha de Roda
TRB	<i>Transportation Research Board</i>
TTC	<i>Time to Collision</i>
UECE	Universidade Estadual do Ceará
VFL	Velocidade de Fluxo Livre
W74	Modelo de <i>Wiedemann-74</i>
W91	Modelo de <i>Wiedemann-91</i>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	14
<b>1.1</b>	<b>Problemas e questões de pesquisa</b> .....	16
<b>1.2</b>	<b>Objetivos</b> .....	16
<b>1.2.1</b>	<i>Objetivo geral</i> .....	17
<b>1.2.2</b>	<i>Objetivos específicos</i> .....	17
<b>1.3</b>	<b>Estrutura da pesquisa</b> .....	17
<b>2</b>	<b>CONDIÇÃO SUPERFICIAL DO PAVIMENTO E SEGURANÇA VIÁRIA</b> .....	19
<b>2.1</b>	<b>Aderência pneu-pavimento</b> .....	19
<b>2.2</b>	<b>Ensaios para quantificação da condição superficial</b> .....	22
<b>2.3</b>	<b>International Friction Index (IFI)</b> .....	24
<b>2.4</b>	<b>Fatores comprometedores da condição superficial</b> .....	26
<b>2.5</b>	<b>Relação da condição superficial com a segurança viária</b> .....	29
<b>3</b>	<b>DESEMPENHO DA SEGURANÇA VIÁRIA E SIMULAÇÃO MICROSCÓPICA</b> .....	35
<b>3.1</b>	<b>Conflitos veiculares e indicadores <i>proxy</i> de segurança viária</b> .....	35
<b>3.2</b>	<b>Simulação microscópica de tráfego</b> .....	38
<b>3.3</b>	<b>Impacto das condições climáticas adversas no comportamento de condução</b> .....	42
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	47
<b>4.1</b>	<b>Caracterização do comportamento do condutor em condições ambientais adversas</b> .....	47
<b>4.1.1</b>	<i>Headway e fluxo de saturação</i> .....	48
<b>4.1.2</b>	<i>Velocidade de fluxo livre</i> .....	49
<b>4.2</b>	<b>Simulação microscópica de tráfego para obtenção das interações veiculares</b> .....	52
<b>4.2.1</b>	<i>Caracterização da rede típica para microssimulação</i> .....	52
<b>4.2.1.1</b>	<i>Volume Veicular</i> .....	53
<b>4.2.1.2</b>	<i>Taxa de Conversão</i> .....	54
<b>4.2.1.3</b>	<i>Tempos Semafóricos</i> .....	54
<b>4.2.1.4</b>	<i>Transporte Público</i> .....	54

4.2.2	<i>Calibração dos parâmetros comportamentais do VISSIM</i> .....	55
4.2.3	<i>Incorporação da variação da condição ambiental na microsimulação</i> .....	56
4.2.4	<i>Plano de simulação para a obtenção das interações veiculares</i> .....	56
4.3	<b>Caracterização da aderência pneu-pavimento para diferentes condições</b>	57
4.3.1	<i>Caracterização do trecho de estudo</i> .....	57
4.3.2	<i>Variação da trilha-de-roda e do estado de conservação</i> .....	58
4.3.3	<i>Variação da condição ambiental</i> .....	59
4.4	<b>Análise dos dados de condição superficial</b> .....	60
4.5	<b>Estimação da frequência e da severidade dos conflitos veiculares</b> .....	61
4.5.1	<i>Análise da frequência dos conflitos veiculares por tipo</i> .....	61
4.5.2	<i>Análise da severidade dos conflitos veiculares pelo indicador proxy DRAC</i>	62
4.5.3	<i>Análise da severidade dos conflitos veiculares pelo indicador proxy MADR</i>	62
4.5.3.1	<i>MADR como um indicador proxy</i> .....	64
4.6	<b>Análise do desempenho da segurança viária em variadas condições ambientais</b> .....	64
5	<b>ANÁLISE DOS RESULTADOS</b> .....	66
5.1	<b>Comportamento do condutor em condições ambientais adversas</b> .....	66
5.1.1	<i>Headway e fluxo de saturação</i> .....	66
5.1.2	<i>Velocidade de fluxo livre</i> .....	71
5.2	<b>Simulação microscópica de tráfego para a extração das interações veiculares</b> .....	75
5.3	<b>Caracterização e análise estatística da aderência pneu-pavimento</b> .....	75
5.3.1	<i>Caracterização do trecho de pesquisa</i> .....	76
5.3.2	<i>Análise estatística para as quatro condições de superfície avaliadas</i> .....	77
5.3.3	<i>Análise estatística para o estado de conservação</i> .....	78
5.3.4	<i>Análise estatística para o impacto das características da operação viária ...</i>	80
5.3.5	<i>Análise dos resultados do método International Friction Index (IFI)</i> .....	81
5.3.6	<i>Distribuição estatística dos parâmetros de micro e de macrotextura</i> .....	83
5.4	<b>Frequência e severidade dos conflitos veiculares microsimulados</b> .....	85
5.4.1	<i>Análise da frequência dos conflitos microsimulados por tipo</i> .....	85
5.4.2	<i>Análise da severidade dos conflitos microsimulados pelo DRAC</i> .....	92
5.4.3	<i>Análise da severidade dos conflitos microsimulados pelo MADR</i> .....	93
5.4.3.1	<i>Análise da severidade pelo MADR</i> .....	95

<b>5.5</b>	<b>Comparação da segurança viária nas condições molhada e seca .....</b>	<b>96</b>
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>99</b>
<b>6.1</b>	<b>Resultados e conclusões da pesquisa .....</b>	<b>99</b>
<b>6.2</b>	<b>Sugestões para trabalhos futuros .....</b>	<b>102</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>104</b>
	<b>APÊNDICE A – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE PÊNDULO</b>	
	<b>BRITÂNICO E MANCHA DE AREIA DO TRECHO DE ESTUDO .....</b>	<b>114</b>



## 1 INTRODUÇÃO

A importância do estudo da segurança viária é evidente devido à falta de segurança no trânsito, em termos globais. Sendo reconhecido como um problema de saúde pública, projeta-se que as fatalidades passem de nono para quinto lugar, em 2030, dentre as principais causas de morte. Estima-se que com este agravamento da problemática resultaria no salto de 1,2 para 2,4 milhões de óbitos por ano (OMS, 2013). Em 2009, os acidentes de trânsito no Brasil ocuparam a nona posição dentre as principais causas de mortes, sendo 41% desses registros envolvendo a faixa etária de 18 a 34 anos. Proporcionalmente, o País apresenta uma das maiores taxas de fatalidades do mundo, com 31 vítimas fatais para cada 100 mil habitantes (Ferraz *et al.*, 2012).

Estimativas da OMS (2004) apontavam que os gastos mundiais com as mortes em decorrência dos acidentes de trânsito já chegavam a 518 bilhões de dólares, anualmente. No cenário nacional, a estimativa é de que, em 2012, gastou-se mais de dezesseis bilhões de reais com acidentes de trânsito, representando de 1 a 2% do Produto Interno Bruto (PIB) do Brasil (ONSV, 2014).

Além da contextualização socioeconômica, a própria natureza multifatorial das colisões de tráfego, que inclui o fator humano, o fator veicular, o fator ambiental e o fator estrutural da via, trata-se de uma dificuldade das análises das ocorrências de acidentes. De todos os fatores citados, a condição superficial da via é um dos únicos passíveis de intervenção com resultados diretos e objetivos, podendo minimizar os riscos atrelados ao tráfego, devido à notória influência do atrito em condições de risco (Henry, 2000; Noyce *et al.*, 2005). Em uma avaliação da condição superficial de pontos críticos de acidentes em rodovias, Pereira (2010) evidenciou que a maioria apresentava deficiência relacionada ao atrito.

Contudo, a relação entre a Segurança Viária (SV) e a condição superficial é complexa, uma vez que não se compreende ao certo os efeitos da combinação do atrito entre os pneus e a via e o comportamento dos condutores. Desta forma, muitos estudos buscam quantificar o potencial do atrito do pavimento em reduzir as taxas de acidentes, evidenciando os efeitos positivos especialmente em dias de chuva (Ivey *et al.*, 1981; Mayora e Piña, 2009; Najafi *et al.*, 2015).

Uma das principais dificuldades em se lidar com o estudo da SV através de registros de acidentes ocorridos, tida como abordagem reativa, é a imprecisão dos dados. Registros incompletos, por vezes não condizentes com a realidade ocorrida, além da recorrente omissão de casos podem levar a más interpretações e a conclusões equivocadas. Além disso, a

necessidade de uma série histórica para dar consistência às análises de acidentes é dificultada pela natureza rara das ocorrências, além de não contribuir proativamente para mitigar a problemática da SV.

Perkins e Harris (1968) foram os precursores dos estudos dos conflitos veiculares, objetivando identificar potenciais situações de risco a fim de avaliar o Desempenho da Segurança Viária (DSV) sem a necessidade de registros históricos. Amundsen e Hydén (1977) consolidaram a definição dos conflitos veiculares, dada como a interação entre dois ou mais veículos ao ponto em que, caso não haja alteração de sentido e/ou de velocidade, culminará em uma colisão. Proposto por Hydén (1987), o conceito do *continuum* da segurança aponta que as interações veiculares passam de eventos sem distúrbio até situações de alto risco, convergindo para a vantagem de uma análise de eventos de maior frequência.

Um dos desafios da análise da SV através dos conflitos veiculares era a dificuldade imposta na quantificação desses eventos, tendo em vista que a observação dessas ocorrências poderia estar susceptível a critérios subjetivos. A análise via filmagens de trânsito se apresentou como uma alternativa, contudo o pesado processamento das imagens e a necessidade da modelagem de algoritmos utilizados na visão computacional são atividades complexas e passíveis de erros. Por outro lado, a ferramenta da simulação microscópica de tráfego, que busca representar fielmente a realidade observada, possibilita a extração de uma série de dados e de parâmetros do comportamento de cada veículo simulado na rede, facilitando a determinação de indicadores alternativos de SV (Barceló *et al.*, 2003; Huguenin *et al.*, 2005; Cunto, 2008).

Para um estudo completo do DSV, tanto frequência quanto severidade devem ser avaliadas; logo, indicadores alternativos (ou *proxy*) de SV foram propostos para a análise dos conflitos veiculares. Diversos estudos consolidados na literatura apontam para a utilização de indicadores espaço-temporal, relacionando posição e velocidade para quantificar a intensidade das interações veiculares (Hayward, 1972; Cooper e Ferguson, 1976; Cooper, 1983).

Associando abordagem proativa a microssimulação, fatores comportamentais dos condutores afetados pelas condições ambientais e do tráfego, podem ser incorporados à análise da SV. Assim, aspectos antes negligenciados podem contribuir para a mitigação dos riscos associados ao tráfego destacadas. Por exemplo, as frenagens veiculares dependem não somente da qualidade da superfície do pavimento e das condições ambientais, mas também da resposta do condutor e da condição do sistema de frenagem do veículo.

Reconhecendo tanto a condição superficial quanto a abordagem proativa como potenciais redutores dos riscos atrelados ao tráfego viário, não há registros da incorporação dos efeitos da aderência pneu-pavimento em medidores *proxy* de conflitos obtidos através do uso

de simulações microscópicas. Neste contexto, esta pesquisa busca avaliar a influência das condições superficiais de atrito em conflitos longitudinais obtidos através de simulação microscópica, incorporando os efeitos da condição climática adversa tanto na aderência pneu-pavimento quanto no comportamento do condutor.

### 1.1 Problemas e questões de pesquisa

Como problema desta pesquisa, identifica-se a negligência das condições de aderência pneu-pavimento como possível mitigador dos riscos de colisão. Condicionado a uma série de fatores, como técnica de pavimentação, materiais utilizados, conservação dos pneus, desgaste da superfície da via, condições ambientais, considerar o nível de atrito de forma determinística pode negligenciar os reais efeitos desta condição na SV.

Além disso, existem limitações na incorporação de aspectos estruturais às análises de SV. Em particular, não se compreende ao certo a magnitude da contribuição da aderência pneu-pavimento na SV, como, também, o quanto esta afeta no comportamento do condutor. Em dias chuvosos, em que há comprovações na literatura da redução dos níveis de aderência (Henry, 2000; Noyce *et al.*, 2005), não existe consenso do grau de comprometimento da SV.

Desta forma, qual a forma mais adequada para incluir a condição do atrito superficial nas análises de SV de meios urbanos? Além do principal questionamento, outras questões são levantadas nesta pesquisa:

- Qual é a diferença entre a aderência pneu-pavimento nas condições seca e molhada de pavimentos asfálticos típicos de vias urbanas?
- De que forma é possível incluir a condição superficial em indicadores *proxy* de segurança viária?
- Quais as principais diferenças no processo de condução nas condições seca e chuvosa em vias urbanas, considerando sua representação em modelos de simulação microscópica?
- Qual a distribuição de frequência e de severidade dos conflitos veiculares obtidos através de simulação microscópica para as condições seca e chuvosa?

### 1.2 Objetivos

Nesta seção, apresenta-se o objetivo geral da pesquisa. Em seguida, são apresentados os objetivos específicos necessários para atingir o objetivo principal.

### **1.2.1 Objetivo geral**

Diante do exposto na contextualização, a abordagem proativa se apresenta como uma promissora aliada para incorporação dos efeitos da aderência pneu-pavimento nos estudos da SV. Logo, o objetivo geral desta pesquisa consiste em propor um método para incluir a influência da condição superficial no DSV em vias urbanas, nas condições ambientais seca e chuvosa, a partir de indicadores *proxy* de SV obtidos através da simulação microscópica.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

Em extensão ao objetivo geral da pesquisa, visando, também, responder às questões levantadas no estudo, os seguintes objetivos específicos são propostos:

- Avaliar a diferença da aderência pneu-pavimento nas condições seca e molhada de pavimentos asfálticos típicos de vias urbanas;
- Incorporar a condição superficial de pavimentos em indicadores *proxy* de segurança viária;
- Verificar as diferenças no processo de condução para as condições seca e chuvosa através dos parâmetros comportamentais de condutores em áreas urbanas;
- Efetivar uma análise comparativa da frequência e da severidade dos conflitos simulados microscopicamente em ambiente de pavimento seco e molhado.

## **1.3 Estrutura da pesquisa**

Esta dissertação de mestrado está dividida em seis capítulos, em que o primeiro contextualizou a problemática que motivou a pesquisa. Também, levanta as questões de pesquisa, bem como elenca os objetivos geral e específicos do trabalho. O segundo capítulo se propõe a avaliar a relação entre condição superficial do pavimento e SV, iniciando na caracterização dos parâmetros da aderência pneu-pavimento, abordando os ensaios que os quantificam e o método do *International Friction Index* (IFI). Ainda do Capítulo 2, as condições que comprometem a condição superficial são discutidas, além de apresentar estudos cuja proposta era relacionar a condição da superfície do pavimento com a SV.

O terceiro capítulo aborda o desempenho da segurança viária através dos conflitos veiculares e de seus indicadores *proxy*. Em seguida, discute-se sobre o uso da ferramenta da

simulação microscópica de tráfego com o viés da SV. Por fim, são discutidos os impactos das condições climáticas adversas no comportamento do condutor e os meios de representa-los através da microssimulação.

O quarto capítulo se destina a apresentar as etapas metodológicas adotadas para a pesquisa, dividido em seis itens. Dois destes itens (4.1 e 4.2) destinam-se à caracterização do comportamento do condutor em condições ambientais adversas e à obtenção dos conflitos veiculares microssimulados. Os itens 4.3 e 4.4 caracterizam a condição superficial para condições distintas e propõem uma análise dos dados obtidos em campo. Em seguida, o item 4.5 estima a frequência e a severidade dos conflitos veiculares obtidos a partir dos diferentes cenários avaliados; sendo o capítulo 4 concluído com a análise do desempenho da SV com a variação da condição ambiental (item 4.6). No quinto capítulo, os resultados referentes às etapas metodológicas são apresentados.

No sexto e último capítulo, são apresentadas as conclusões e as considerações finais obtidas nesta pesquisa. Nesta seção, as limitações do estudo também são apontadas, com o intuito de propor trabalhos futuros.

## 2 CONDIÇÃO SUPERFICIAL DO PAVIMENTO E SEGURANÇA VIÁRIA

Neste capítulo, serão abordados os temas relevantes da condição superficial, conectando-os com seus efeitos na segurança viária (SV). O objetivo central deste capítulo é discutir sobre como incluir a condição superficial como fator de impacto na SV. Entende-se que a aderência entre os pneus dos veículos e a superfície condiciona diretamente o potencial de frenagem, o que leva à conceituação deste fator na primeira seção (2.1). Diversas formas são aplicadas para quantificar a aderência pneu-pavimento, que é brevemente discutida na Seção 2.2, quantificando ambos os parâmetros superficiais – macro e microtextura – separadamente.

Em seguida (Seção 2.3), apresenta-se o *International Friction Index* (IFI), o qual é utilizado para reportar macro e microtextura em um único fator, padronizado e em escala. Como a proposta desta pesquisa é a inclusão dos efeitos da condição ambiental na SV através da condição superficial dos pavimentos, a Seção 2.4 se propõe a discutir quais fatores comprometem o atrito disponível, como a ocorrência das precipitações. Por fim, a Seção 2.5 visa a apresentar estudos convergentes ao entendimento dos efeitos da aderência superficial no Desempenho da Segurança Viária (DSV).

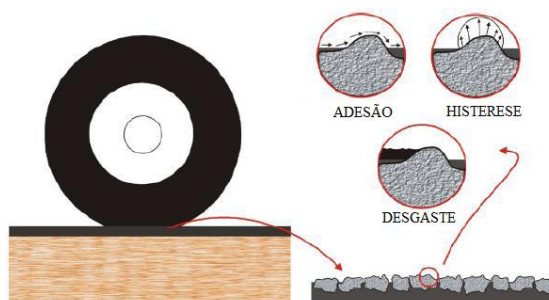
### 2.1 Aderência pneu-pavimento

A condição superficial do pavimento é o principal determinante da aderência existente na interface entre o pneu e o pavimento. Conforme o veículo percorre a via, forças de fricção contribuem para a dirigibilidade do automóvel, bem como para a capacidade de frenagem e de aceleração. Ao passo de que não é possível garantir as mais favoráveis condições ambientais e respostas dos condutores aos estímulos do tráfego, interferir nas propriedades da superfície do pavimento a fim de maximizar a condição de aderência pneu-pavimento se torna uma opção, podendo contribuir positivamente no DSV.

A força de atrito resulta de dois fenômenos: histerese e adesão. A histerese ocorre devido à deformação que a superfície do pneu é submetida, uma vez em contato com as irregularidades da superfície do pavimento. A dissipação da energia proveniente desta deformação da borracha nas reentrâncias do pavimento é o resultado da histerese. Já a adesão é atribuída às ligações moleculares das superfícies, devido às atrações. O rompimento de tal afinidade intermolecular é o que dá magnitude à adesão (Kokkalis e Panagouli, 1998).

A histerese é pouco influenciada pela presença de líquidos ou agentes contaminantes (como água, óleo, poeira, etc.) que reduzem a aderência superficial. Contudo, a

adesão, maior parcela do mecanismo de contato, é diretamente dependente dos esforços abrasivos na interface pneu-pavimento; desta forma, explica-se o porquê da redução da aderência em vias molhadas, por exemplo. Além da adesão e da histerese, Andresen e Wambold (1999) apontaram que o desgaste, resultante do rompimento da borracha devido à concentração dos esforços no pneumático, também conhecido como “emborrachamento” da pista pode contribuir para reduzir o atrito superficial (Figura 1).



**Figura 1** – Componentes da força de atrito (Andresen e Wambold, 1999)

A aderência pneu-pavimento pode ser definida como um indicador de resistência da superfície do pavimento ao deslizamento ou à derrapagem veicular, tratando-se da principal propriedade relacionada ao coeficiente de atrito. Este, por sua vez, pode ser dividido em duas componentes distintas: coeficiente de atrito longitudinal e transversal. O primeiro determina o atrito longitudinal ao movimento veicular, o qual influencia diretamente o potencial de frenagem. Já o segundo, trata-se do atrito perpendicular à direção veicular, que permite a execução de curvas e a mudança de faixa.

Wambold *et al.* (1986) definiram a aderência pneu-pavimento como a característica resultante de duas características da superfície do pavimento distintas e independentes – microtextura e macrotextura. A primeira, relacionada à rugosidade presente na superfície dos agregados utilizados na mistura asfáltica, condiciona o atrito superficial. Já a segunda relacionada à textura superficial, é definida como as asperezas superficiais do pavimento causadas pelas protuberâncias dos agregados graúdos.

A microtextura está diretamente ligada à capacidade dos agregados em resistir aos efeitos do polimento superficial. Podendo ser definida como a angularidade da aspereza superficial dos agregados. Esta característica é fundamental para a qualidade do atrito em baixas velocidades de rolamento. A manutenção deste parâmetro, que pode ser classificado de rugoso a polido, contribui para o aumento das forças de fricção, devido à interação da rugosidade dos agregados com os pneus, gerando forças de adesão que compõem o atrito. Em pavimentos

molhados, a microtextura exerce a importante função de romper a película d'água existente na interface pneu-pavimento (Wambold *et al.*, 1995).

A macrotextura é o principal parâmetro para definir a condição de atrito do pavimento. Esta componente é diretamente afetada por fatores relacionados à técnica de pavimentação adotada, variando de aberta a fechada. Por exemplo, em misturas asfálticas cuja distribuição granulométrica é aberta, a grande concentração de agregados graúdos resulta em maior variação superficial da textura do compósito. A angularidade e a forma dos agregados também são fundamentais, uma vez que partículas lamelares e alongadas tendem a ter melhor orientação horizontal, reduzindo a macrotextura do revestimento. Fundamental para a capacidade drenante da superfície do pavimento, esta característica é importante para a manutenção do atrito em velocidades de deslocamento mais elevadas (Henry, 2000).

A variação superficial dos pavimentos pode ser descrita a depender das magnitudes na horizontal (comprimento de ondas) e na vertical (amplitude) do perfil; a *Permanent International Association of Road Congresses* (PIARC, 1987) definiu quatro níveis distintos de variação superficial: micro, macro, megatextura e irregularidade. A ASTM E867-06 (2012) definiu os limites e os domínios de variação superficial, incluindo, além da micro e da macrotextura, os níveis de megatextura e de irregularidade. Segundo a ASTM E867-06 (2012), a irregularidade é a maior magnitude de variação, na ordem de grandeza métrica, tendo como nível de referência um trecho de via pavimentado. Em seguida, a megatextura é definida como o nível de variação superficial que afeta diretamente os pneus, contribuindo para as trepidações do veículo no rolamento.

Tabela 1 apresenta a definição dos diferentes domínios de textura superficial. A Figura 2 esquematiza a diferença dos níveis de macrotextura, variação topográfica superficial da mistura asfáltica que condiciona a área de contato pneu-pavimento, e de microtextura, rugosidade ou aspereza intrínseca aos agregados, a qual é imperceptível a olho nu.

**Tabela 1** – Limites dos domínios de variação superficial (ASTM E867-06, 2012)

<b>Domínio</b>	<b>Dimensão Horizontal</b>	<b>Dimensão Vertical</b>
Microtextura	0,0 - 0,5 mm	0,0 - 0,2 mm
Macrotextura	0,5 – 50 mm	0,2 – 10 mm
Megatextura	5 – 50 cm	1 mm – 50 mm
Irregularidades	0,5 m – 50 m	1 mm – 20 cm

A importância destes parâmetros para a SV pode ser relacionada à capacidade de executar manobras evasivas, uma vez que melhores condições de atrito fornecem maior dirigibilidade e controle do veículo. Para baixas velocidades (< 20 km/h), a magnitude da



aderência pneu-pavimento é condicionada pela qualidade da microtextura, devido à interação da superfície do pneu com a rugosidade dos agregados. Conforme a velocidade aumenta, as forças de fricção tendem a diminuir por causa da perda de contato superficial, sendo agravadas em pavimentos com baixa profundidade média da macrotextura (Noyce *et al.*, 2005).



**Figura 2** – Níveis de microtextura e de macrotextura (Autor, 2017)

## 2.2 Ensaios para quantificação da condição superficial

Diversos são os ensaios disponíveis e consolidados na literatura para quantificar ambas as propriedades de micro e de macrotextura. Kogbara *et al.* (2016) apresentam um estudo do estado-da-arte, no qual lista os principais métodos de determinação de ambas as propriedades, assim como os equipamentos utilizados e a ordem de grandeza dos resultados.

Na medição da microtextura, podem ser citados quatro tipos de equipamentos: *i*) estáticos; *ii*) pneu oblíquo; *iii*) pneu travado; e *iv*) pneu parcialmente travado; tendo os três últimos a característica de medir e reportar continuamente a microtextura em comum. A maioria dos ensaios é executada sobre superfície molhada, em busca de representar a condição superficial mais propensa às derrapagens. O ensaio empregado com maior frequência na literatura é o do tipo estático, através do pêndulo britânico, normatizado pela *American Society for Testing and Materials* (ASTM E303-93, 2013), equipamento dotado de uma haste cuja extremidade de borracha desliza sobre o pavimento, quantificando a impedância ao movimento exercida pela superfície. O resultado do ensaio é expresso em BPN (*British pendulum number*), uma unidade adimensional.

Em uma tentativa de avaliar a diferença da microtextura na condição de pavimento seco e molhado, Ali *et al.* (1999) executaram dois diferentes ensaios em vias urbanas típicas. O ensaio foi executado com pêndulo britânico, primeiramente, sem molhar a superfície ensaiada e, em seguida, conforme a ASTM E303-93 (2013), molhando a superfície a ser ensaiada. Na avaliação das Trilhas de Roda (TR) esquerda e direita com e sem a presença de água na

superfície, registraram-se reduções médias de BPN de 31% e 32%, respectivamente. Em seguida, utilizou-se o ensaio com o veículo-teste, medindo a distância percorrida durante o travamento completo das rodas a 50 *km/h* até a total parada, também para as duas condições distintas de superfície. Em média, os autores observaram redução do atrito superficial de 18% da condição seca para molhada. Dan *et al.* (2017) conduziram experimento semelhante, em que se observou mudança no BPN médio de 80,1 para 58,0 quando comparada a condição seca com molhada (redução de 28%, em média).

A macrotextura pode ser estimada por três tipos de técnicas distintas: *i*) volumétricas; *ii*) perfilômetros; e *iii*) drenômetros. O ensaio mais comumente empregado é da técnica volumétrica de mancha de areia (ASTM E965, 2015), que quantifica a profundidade média da textura superficial através da razão do volume de 25 *cm*<sup>3</sup> de material padronizado espalhado na superfície e da área da mancha, determinada pela medição do diâmetro da mesma. Os ensaios com o uso de drenômetros, por sua vez, aferem a macrotextura de forma indireta, através da vazão de água na superfície do pavimento. Os perfilômetros são equipamentos modernos, que aferem a macrotextura continuamente através de *lasers*. Esforços mais recentes buscam novos métodos de caracterizar com confiança a superfície de misturas asfálticas de forma mais rápida e eficiente. Sengoz *et al.* (2012) avaliaram a textura superficial através de escaneamento 3D com laser, com um equipamento capaz de registrar até 1.000 pontos de textura de uma área de 100 *mm* de largura escaneando em uma velocidade de 0,1 *m/s*. Os resultados obtidos pelo escaneamento 3D da macrotextura foram comparados com aqueles obtidos através do ensaio da mancha de areia, observando significativa correlação ( $r^2$  de 0,97). Apesar de eficiente, a principal barreira a ser vencida pelo método é o custo do equipamento.

Araujo *et al.* (2015) empregaram o Processamento Digital de Imagem (PDI) para avaliar a textura superficial de corpos-de-prova de quatro diferentes misturas asfálticas extraídas de campo. No estudo, os autores utilizaram o equipamento *Aggregate Image Measurement System* (AIMS) para avaliar, em laboratório, a macro e a microtextura dos corpos-de-prova extraídos. Não foi observada correlação dos resultados ( $r^2$  de 0,01) de macrotextura obtidos através do uso do equipamento (*Estimated Texture Depth*, ETD), com os resultados obtidos através da realização do ensaio de mancha de areia (*Hight of Sand*, HS). Comparando a microtextura obtida com o uso do AIMS com aquela gerada através do pêndulo britânico, obteve-se baixa correlação ( $r^2$  de 0,39). Pelos resultados, os autores apontam a necessidade de se avaliar diferentes tipos de agregados e de granulometrias, no intuito de obter resultados mais conclusivos. Além disso, foram avaliados apenas dois corpos-de-prova por mistura asfáltica, podendo esta ser considerada uma amostragem não significativa.

Tratando-se de propriedades independentes, diferentes fatores comprometem a macrotextura e a microtextura. Para a propriedade de macrotextura, tamanho máximo de agregado, tipos de agregados graúdos e miúdos, teor de ligante da mistura asfáltica, viscosidade do ligante asfáltico, distribuição granulométrica e volume de vazios da mistura asfáltica são citados. Para a microtextura, o principal fator que pode influenciar este parâmetro é a origem mineralógica dos agregados graúdos que compõem a mistura asfáltica, que podem apresentar diferenças mais significativas quanto à resistência ao polimento (Hall *et al.*, 2009).

### 2.3 International Friction Index (IFI)

Dada a importância da microtextura e da macrotextura para a aderência pneu-pavimento e, conseqüentemente, para o rolamento seguro dos veículos, Wambold *et al.* (1995) propuseram o uso do *International Friction Index* (IFI) (ASTM E1960-07, 2015), através de um experimento internacional de comparação e de harmonização de métodos e de medidas de textura e de atrito. Basicamente, a ideia do IFI era reportar, em um único valor padronizado e em escala, as magnitudes de microtextura e de macrotextura. Diante da já citada diversidade de ensaios existentes e da variação de magnitude de resultados, o IFI foi idealizado para reportar a condição superficial em um índice de mesma magnitude, corrigindo os resultados com o uso de constantes de regressão, a depender do tipo de ensaio empregado.

Para determinar o IFI, necessita-se, inicialmente, realizar medidas de atrito e de textura no pavimento. Assim, como primeiro passo do modelo, busca-se estimar a constante de referência da velocidade ( $S_p$ ), a qual representa a influência da velocidade, expressa em *km/h* (Equação 1). Utiliza-se o resultado do ensaio que quantifica a macrotextura para determinar  $S_p$ , aqui conotado como  $T_x$ , o qual é corrigido por constantes de regressão,  $a$  e  $b$ , a depender do ensaio empregado. Wambold *et al.* (1995), Aps (2006) e ASTM E1960-07 (2015) apresentam, por tipo de ensaio, as constantes  $a$  e  $b$ .

$$S_p = a + b \cdot T_x \quad (1)$$

Em seguida, tem-se o ajuste do valor do atrito, medido por um determinado tipo de equipamento a uma velocidade  $S$  (*km/h*), para a velocidade de 60 *km/h*. A variável  $FR_s$  representa o resultado obtido através do ensaio que quantifica a microtextura. No ensaio com o pêndulo britânico, por exemplo, mede-se a força de fricção em velocidade baixa (10 *km/h*).

Neste ajuste, utiliza-se o valor de  $S_P$  (Equação 2), reportando o valor do atrito obtido com o uso do equipamento convertido à velocidade de 60 *km/h* ( $FR_{60}$ ).

$$FR_{60} = FR_S \cdot e^{[(S-60)/S_P]} \quad (2)$$

Aps (2006) afirma que, no intuito de se obter um índice válido para os diversos equipamentos e testes empregados, houve a necessidade de fixar um valor real para o atrito. Contudo, segundo esta autora, na ausência deste valor real, combinaram-se as medidas obtidas a partir de diferentes equipamentos em diferentes faixas de velocidade, obtendo uma curva de atrito versus velocidade, denominada de curva de referência. Por fim, o coeficiente de atrito à velocidade de 60 *km/h* ( $F_{60}$ ) na Curva de Referência é estimado com o auxílio da regressão linear, a partir de  $FR_{60}$  e  $T_X$ , cujas constantes de calibração,  $A$ ,  $B$  e  $C$ , são próprias de cada equipamento e teste utilizados (Equação 3). O método do IFI permite, ainda, a determinação do coeficiente de atrito padronizado para diferentes velocidades ( $F_S$ ). A Equação 4 apresenta o cálculo para a determinação do  $F_S$  a partir do ajuste do coeficiente de atrito  $F_{60}$ .

$$F_{60} = A + B \cdot FR_{60} + C \cdot T_X \quad (3)$$

$$F_S = F_{60} \cdot e^{[(60-S)/S_P]} \quad (4)$$

Em uma aplicação direta do método do IFI, Aps (2006) buscou viabilizá-lo como uma ferramenta de gerência de pavimentos. Desta forma, a autora propôs faixas de classificação da condição de aderência pneu-pavimento, através do  $F_{60}$ , com o objetivo de evidenciar a necessidade da realização de intervenções pelos órgãos responsáveis (Tabela 2). Além disso, a autora definiu este limite de intervenção para ambos os parâmetros,  $S_P$  e  $F_{60}$ , de 37,98 e 0,15, respectivamente.

**Tabela 2** – Faixas de Classificação do  $F_{60}$  Obtido pelo Método do IFI (Aps, 2006)

<b>Classificação</b>	<b>Faixa de <math>F_{60}</math></b>	
Péssimo	$\leq 0,05$	
Muito Ruim	0,06	0,08
Ruim	0,09	0,11
Regular	0,12	0,14
Bom	0,15	0,21
Muito Bom	0,22	0,35
Ótimo	$> 0,35$	

Fuentes *et al.* (2012) conduziram um estudo com o objetivo de identificar as limitações do modelo do IFI, focando na sensibilidade do parâmetro da constante de referência da velocidade ( $S_P$ ) a partir de variações de macrotextura. Foram conduzidos ensaios da condição superficial de pavimentos em condição extremas – macrotextura variando de 0,16 a 2,50 mm. Os autores identificaram que o parâmetro  $S_P$  não se correlaciona com pavimentos cuja macrotextura é superior a 1,50 mm, sugerindo este valor como limite superior para a aplicação do método do IFI.

Mais recente, Chowdhury *et al.* (2017) buscaram validar o modelo de previsão de aderência pneu-pavimento do IFI. Dados de campo foram obtidos de 35 seções pavimentadas com concreto asfáltico (CA) convencional e 35 de superfícies com tratamento *chip seal*, que se equivale à técnica de tratamento superficial no Brasil. Os autores obtiveram coeficiente de atrito dos trechos com o uso do equipamento *Dynamic Friction Tester* (DFT), profundidade média do perfil, equivalente à macrotextura, com o *Circular Texture Meter* (CTMeter). Obteve-se correlação linear ( $r^2$ ) de 0,94. Pelos resultados de atrito medidos com o DFT com os obtidos pelo modelo do IFI, obteve-se correlação linear ( $r^2$ ) de 0,94 para as superfícies tratadas com *chip seal* e de 0,61 para as superfícies de CA convencional. Apesar de refletir a realidade norte-americana, estes resultados são importantes indicativos da adequabilidade do modelo do IFI na determinação do coeficiente de atrito superficial de pavimentos executados com misturas asfálticas.

## 2.4 Fatores comprometedoras da condição superficial

Além da macro e da microtextura, diversos fatores também podem comprometer a qualidade da condição de atrito superficial. São citados os efeitos cumulativos do envelhecimento do ligante asfáltico e dos esforços oriundos do tráfego, a velocidade veicular, a condição das ranhuras dos pneus, o escorregamento da mistura asfáltica, os efeitos da temperatura e a presença de água ou de contaminantes deslizantes. Além destes, a qualidade, a granulometria e as propriedades físico-químicas dos agregados, bem como as características da mistura asfáltica são importantes para determinar a qualidade da aderência pneu-pavimento (Asi, 2007; Kogbara *et al.*, 2016).

A condição ambiental apresenta uma importante combinação de fatores que influenciam na qualidade da aderência pneu-pavimento, como a temperatura ambiental que afeta a superfície do pavimento. Isto pode ser explicado devido à natureza viscoelástica do ligante asfáltico, ou seja, ao comportamento susceptível às variações de temperatura. Colony

(1992), Henry (2000) e Wilson (2013), por exemplo, constataram que as medições de aderência pneu-pavimento realizadas em períodos mais frios do ano são, em média, de 15 a 20% superiores em relação às executadas durante o verão. Uma das explicações dada pelos autores é que, devido ao aumento da temperatura, a resiliência da borracha presente nos pneus aumenta, causando a redução das perdas por histerese. Além disso, este aumento pode acarretar em alteração das rigidezes tanto das misturas asfálticas quanto do pneumático.

Do *et al.* (2014) conduziram estudos em laboratório para avaliar os efeitos da contaminação da superfície por agregados muito finos (poeira) no atrito superficial, a fim de captar a variação nos três períodos: estiagem, chuva e estiagem. Em relação à condição de pavimento seco e limpo, os autores verificaram uma redução do coeficiente de atrito na ordem de 15% com a presença de contaminantes em vias secas. Na primeira exposição à água, a redução do atrito atingiu 30%; porém, observou-se uma recuperação de 5% do coeficiente de atrito, ao longo da exposição contínua à água, sendo atribuída à completa remoção do contaminante.

As precipitações também podem causar variações no atrito superficial de pavimentos. Medições de aderência pneu-pavimento feitas pouco após a incidência da primeira chuva de inverno (período chuvoso) devem ser superiores às medições feitas durante o verão (período seco), devido à retirada do material acumulado na superfície, como poeira, óleo e outros contaminantes. Este efeito, contudo, é minimizado conforme a temporada chuvosa se alonga (Henry, 2000).

Kokkalis e Panagouli (1998) apontaram que as reduções da aderência pneu-pavimento variam de 50% (para superfícies deficitárias em macro e microtextura) até 15% (para superfícies com condições ideais de macro e de microtextura). Além disso, os autores também pontuam que tanto a espessura da lâmina d'água quanto a velocidade de deslocamento do veículo contribuem para a redução dos níveis de atrito. Esta redução se dá devido à ação do fluido como lubrificante na área de contato entre o pneu e o pavimento.

Fwa e Ong (2008) conduziram experimento de laboratório para identificar a razão da redução do atrito superficial em vias molhadas. Para uma película d'água constante (7,62 mm), a área de contato direto (ou área trativa) entre o pneu e o pavimento se reduz em mais de 40% para velocidades entre 40 e 60 km/h. Para a velocidade de 80 km/h, toda a área de contato entre o pneu e o pavimento estava comprometida pela presença de água. Os autores apontam que, como consequência do aumento da velocidade, além da redução da área trativa, aumenta-se a força oriunda da pressão do fluido sob o pneumático, acarretando na diminuição da força normal entre o pneu e o pavimento.

Veith (1983) constatou os efeitos tanto da velocidade quanto da espessura da película d'água na redução do atrito entre o pneu e o pavimento, através da execução do ensaio de roda lisa travada. Para velocidades baixas (em torno de 30 *km/h*), não se observou variação significativa do atrito para espessuras de 0,125 *mm* até 7,5 *mm*. Todavia, para velocidades mais altas (96 *km/h*), observou-se mais de 70% de redução da aderência pneu-pavimento. Estes resultados evidenciam a importância do ajuste do comportamento dos condutores diante de condições adversas.

Dan *et al.* (2017) obtiveram resultados semelhantes avaliando a condição superficial através da realização do ensaio com pêndulo britânico. Diferentemente do estudo conduzido por Veith (1983), os autores obtiveram variações mais significativas para velocidades baixas, tendo em vista que o ensaio utilizado é realizado a 10 *km/h*. Constatou-se o agravamento do comprometimento da aderência pneu-pavimento, especialmente até 0,15 *mm* de espessura de filme de água. Ambas as pesquisas, entretanto, obtiveram resultados com tamanho amostral reduzido, em que se executou uma leitura para cada condição avaliada.

Para eliminar a dependência no ajuste do condutor às condições ambientais, algumas rodovias holandesas impõem limite de velocidade variável baseado na intensidade das precipitações. Como exemplo, vias com velocidade máxima de 75 *km/h* em dias sem chuva têm seus limites reduzidos para 50 *km/h* na ocasião de chuvas muito intensas (6 a 30 *mm/h*) (Jonkers *et al.*, 2008). Segundo Katz *et al.* (2012), no estado de Washington, Estados Unidos, também se adota variação da velocidade máxima permitida, a depender da condição ambiental. Vias de 65 *mi/h* (105 *km/h*) podem ter suas velocidades máximas reduzidas para 35 *mi/h* (56 *km/h*) em dias de chuva muito intensa.

Apesar de intuitivos, Wilson (2013) defende que os impactos das precipitações na variação do atrito superficial não são satisfatoriamente compreendidos, ao ponto de permitir a modelagem confiável do fenômeno. O que se pode compreender, entretanto, é que os impactos dessa condição devem ser meticulosamente considerados em prol da segurança viária. Estudos empíricos apontam, inclusive, que a presença de água oriunda da chuva no pavimento traz impactos negativos para a segurança viária.

Wambold *et al.* (1986) apontaram que a frequência de acidentes em pistas molhadas pode chegar a ser quatro vezes superior àquela encontrada na condição de pavimento seco. Caliendo *et al.* (2007) constataram que vias molhadas contribuem para aumentar a frequência de colisões de elevada severidade (com vítimas feridas e fatais) em trechos curvos e retilíneos. Outros autores também constataram que a incidência de precipitações é associada ao aumento da frequência de acidentes (Scott, 1986; Fridstrom *et al.*, 1995; Chang e Chen, 2005). Na seção

seguinte, estudos mais detalhados do comprometimento da segurança viária relacionados à condição superficial e à presença de água no pavimento são abordados.

## 2.5 Relação da condição superficial com a segurança viária

Rizenbergs *et al.* (1976) publicaram um dos primeiros estudos relacionando dados de acidentes ao atrito superficial. A base de dados de 770 milhas de rodovias, de duas faixas e acesso limitado, foi agrupada em 110 seções-teste. Os autores propuseram um modelo exponencial (Equação 5) com a proporção de Acidentes em Vias Molhadas (%AVM) como variável dependente, indicando efeito positivo da Condição Superficial (CS) na redução da frequência de acidentes. Os autores apontaram a grande dispersão, constatada pela análise visual da plotagem gráfica dos pontos, como limitação dos resultados obtidos, o que evidenciou a existência de outros fatores que também poderiam afetar na ocorrência de acidentes, como aspectos geométricos da via e o volume veicular. A discussão se limitou aos aspectos operacionais e geométricos das rodovias, não levantando hipóteses sobre os efeitos do ajuste comportamental dos condutores devido às precipitações.

$$\%AVM = 16 + 10^{(1,92 - 0,027 \cdot CS)} \quad (5)$$

Ivey *et al.* (1981) determinaram um índice de segurança para dias chuvosos (wet weather safety index, WWSI) através da análise de dados oriundos de 68 segmentos viários. Na modelagem estatística, os autores utilizaram cinco variáveis independentes para dois tipos distintos de vias para a proporção de Acidentes em Vias Molhadas (%AVM) como variável dependente: *i*) vias urbanas, de baixa velocidade (< 90 km/h); e *ii*) rodovias, de velocidade elevadas (> 90 km/h). No modelo #1, Volume Veicular (VV), nível de Acessibilidade (A), Condição Superficial (CS) medida através do ensaio de roda travada com ranhuras, proporção do Tempo em que a via esteve Molhada (TM) e Número de Faixas (NF) foram as variáveis explicativas (Equação 6); o segundo modelo apresentou melhor correlação considerando as variáveis Velocidade Média (VM) e variação da velocidade ( $\Delta V$ ) ao invés de TM e NF (Equação 7). Obteve-se coeficiente de correlação linear ( $r^2$ ) de 0,58 e 0,46, respectivamente. Pelos resultados obtidos, os autores apontaram para a existência de relação linear entre a condição superficial e a ocorrência de acidentes em vias molhadas. Pelas regressões lineares obtidas, a %AVM se mostrou mais sensíveis à variação do volume veicular em vias urbanas (de velocidades reduzidas); a condição superficial, todavia, mostrou-se ser 4 vezes menos relevante



em rodovias de velocidades elevadas. Entende-se que a contribuição da condição superficial para a segurança viária aumenta conforme se permitem velocidades mais elevadas, uma vez que proporciona aos condutores maior controle veicular e mais condição de frenagem, especialmente em vias molhadas. O tamanho amostral reduzido (32 segmentos rodoviários e 36 segmentos de vias urbanas) utilizado para a regressão linear, entretanto, pode ter contribuído para obter resultados não significativos.

$$\%AVM_{\#1} = -21,7 + 0,0009 \cdot VV + 2,34 \cdot A - 0,40 \cdot CS + 286 \cdot TM + 1,32 \cdot NF \quad (6)$$

$$\%AVM_{\#2} = -0,75 + 0,0001 \cdot VV - 0,053 \cdot VM + 0,54 \cdot \Delta V + 0,69 \cdot A - 0,025 \cdot CS \quad (7)$$

Gandhi *et al.* (1991) utilizaram o  $\mu$ -Meter para quantificar o atrito superficial, no intuito de avaliar os efeitos desta condição na ocorrência de acidentes em vias molhadas. Utilizando a razão entre acidentes em vias molhadas e acidentes em vias secas como variável dependente, o coeficiente de correlação ( $r^2$ ) de 0,55 evidenciou a relação linear entre a ocorrência de acidentes e a condição superficial. Porém, pouco se afirma sobre a tendência do coeficiente de atrito na SV, uma vez que os acidentes ocorridos em vias molhadas podem envolver outros fatores além do atrito, como, por exemplo, o comportamento dos condutores.

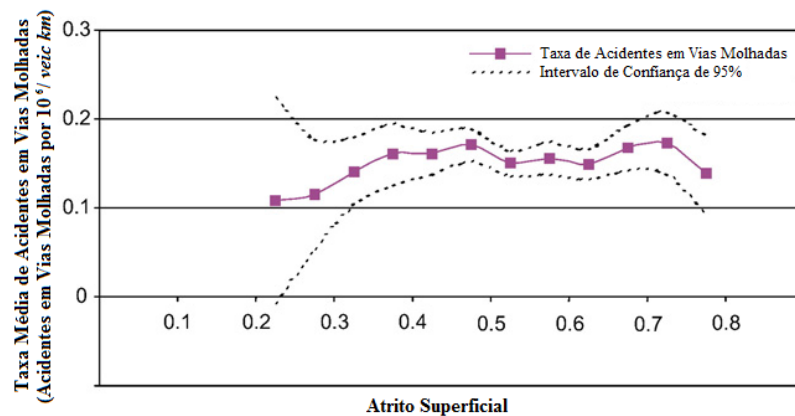
Kuttesch (2004) avaliou a taxa anual de acidentes em vias molhadas relacionada ao nível de atrito superficial, obtido através do ensaio com equipamento de roda lisa travada SN(64)S. O estudo mostrou relação linear decrescente da variável dependente de Taxa de Acidentes em vias Molhadas (TAM) com o aumento da variável independente de Condição Superficial (CS) (Equação 8). Contudo, com um insignificante coeficiente de correlação ( $r^2$ ) de 0,0037, o que pode ser explicado devido à influência de outros fatores na ocorrência de acidentes; além disso, utilizando o log-normal da TAM como variável dependente em uma modelagem linear (Equação 9), também foi constatada sua redução conforme o Volume Veicular (VV) aumentava ( $r^2$  de 0,2991), corroborando com a natureza multifatorial das ocorrências.

$$TAM = 5,8 - 0,077 \cdot CS \quad (8)$$

$$\ln(TAM) = 1,96 - 0,0000247 \cdot VV \quad (9)$$

Lindenmann (2006) avaliou a relação da condição superficial como fator decisivo no desenvolvimento de pontos críticos de acidentes, além de avaliar a influência do atrito na ocorrência de acidentes na condição de pista molhada para 6.077 km de rodovias. Os dados de condição superficial, obtidos através do equipamento *Sideway Force Coefficient Routine*

*Investigation Machine* (SCRIM), foram disponibilizados para cada faixa em intervalos de 100 m. Já os dados de acidentes registrados foram disponibilizados em agrupamentos de 500 m, contando com cinco anos de registros. No intuito de parear os dados de atrito e de acidentes, para cada segmento rodoviário, selecionou-se o pior índice de atrito superficial, como forma de representar o pior cenário possível. Foram identificados 790 pontos críticos de ocorrência de acidentes, com apenas 19 destes (2,4%) apresentando condição superficial classificada como baixa. Agrupando os segmentos viários analisados em classes de atrito, determinou-se a taxa média de acidentes na condição molhada e o intervalo de confiança de 95% desse valor. Pela análise gráfica (Figura 3), o autor não constatou nenhuma tendência do efeito da condição superficial na ocorrência de acidentes em vias molhadas, evidenciando que a avaliação desta relação não é tarefa trivial e requer estudos mais aprofundados.



**Figura 3** – Relação da Taxa Média de Acidentes em Vias Molhadas e Atrito Superficial (Lindenmann, 2006)

Mayora e Piña (2009) utilizaram dados de condição superficial e de acidentes em mais de 1.750 km de rodovias na Espanha, no intuito de quantificar a relação entre aderência e segurança viária. Foram utilizados registros de acidentes de dois períodos de cinco anos (de 1993 a 1997; e de 1997 a 2002) nas análises e resultados da condição superficial obtidos através do ensaio com o SCRIM. Para os resultados obtidos, tanto na condição seca quanto na molhada, as taxas de acidentes tendiam a reduzir conforme a condição superficial se elevava. Além disso, melhorias na condição superficial foram apontadas como capazes de reduzir até 68% nas taxas de acidentes sobre vias molhadas em trechos retilíneos. Esta contribuição salta para até 84% de redução da acidentalidade em trechos curvos em dias de chuva. É válido ressaltar que a avaliação se limitou a segmentos com geometria uniforme, excluindo interseções e vias de acesso – prováveis zonas de alta incidência de colisões. Também, o estudo não levantou discussões acerca da existência de ajuste comportamental dos condutores em dias chuvosos, o

que poderia justificar as taxas de acidentes com vítimas ocorridos em vias molhadas serem inferiores aos ocorridos em vias secas (17% de 1993 a 1997 e 18% de 1997 a 2002).

Pereira (2010) buscou mapear pontos de rodovias federais com alta incidência de acidentes, no intuito de identificar a possível correlação entre a condição superficial e esta ocorrência. Em seu estudo, a autora identificou 36 pontos críticos em três rodovias federais e monitorou a aderência pneu-pavimento nestes locais. Dos pontos ensaios, esta autora constatou que, aproximadamente, 42% não apresentavam deficiências nas propriedades da condição superficial; aproximadamente, 3% apresentavam macrotextura deficiente; e, aproximadamente, 56% apresentavam baixos índices de aderência pneu-pavimento, necessitando de melhorias em ambos os parâmetros (micro e macrotextura). No intuito de modelar a quantidade (Q) de acidentes, a autora usou quatro variáveis independentes: *i*) Geometria (G) da via; *ii*) Condição (C) da pista de rolamento; *iii*) microtextura (BPN); e *iv*) macrotextura (HS) (Equação 10). Como resultado da modelagem, obteve-se baixo coeficiente de correlação ( $r^2$  de 0,1205). Na análise da significância dos regressores, a autora constatou considerável probabilidade das variáveis avaliadas em não influenciar na quantidade de acidentes, de 39%, 46%, 27% e 9% para G, C, BPN e HS, respectivamente. Como conclusões, a autora apontou que, frente à notória influência destes parâmetros na ocorrência de acidentes, a amostra obtida não foi representativa do total de acidentes ocorridos. Além disso, apontou que este resultado pode ser interpretado como evidência de que outras variáveis, como o componente humano e as condições climáticas, exercem influência na ocorrência dos acidentes.

$$Q = \frac{1}{\left(0,114445 + \frac{0,15906}{G^2} - 0,102470 \cdot C + 0,000148 \cdot BPN^2 + 0,26232 \cdot HS^2\right)^2} \quad (10)$$

Li *et al.* (2013) avaliaram os efeitos do atrito superficial na severidade dos acidentes registrados. Os dados da condição de atrito superficial, obtidos através de ensaios com equipamento com roda lisa bloqueada, variam de 1 a 99, sendo agrupados em 3 grupos qualitativos: *i*) ruim (de 1 a 25); *ii*) satisfatório (de 26 a 50); e *iii*) bom (de 51 a 99). Os acidentes foram classificados em 5 níveis de severidade, sendo atribuídos escores, de 1 a 5, para cada: *i*) dano material; *ii*) possível ferimento; *iii*) ferimento não-incapacitante; *iv*) ferimento incapacitante; e *v*) fatal. A severidade foi computada como a média aritmética destes registros. Assim, satisfatória correlação linear (valor-*p* de 0,037) foi obtida entre a condição de atrito e a severidade dos acidentes, em que pontos com atrito classificados como “ruim” apresentaram

maior severidade média de acidentes quando comparados aos demais níveis de qualidade superficial. Contudo, os autores adotaram apenas três faixas qualitativas para classificar a condição de atrito superficial, em que, inclusive, em uma escala de 0 a 100, 50 já se classificava como “bom”, o que pode convergir para resultados enviesados.

Amini e Beigi (2015) propuseram uma modelagem estatística dos efeitos da aderência pneu-pavimento na taxa de acidentes ocorridos em interseções não-semaforizadas na condição de pavimento molhado. Aproximadamente, 200 registros de acidentes nas condições especificadas foram avaliados com relação à condição de atrito obtidos através do método do IFI, indicando que os menores coeficientes de atrito foram encontrados nas interseções com as mais elevadas taxas de acidentes. O modelo log-linear da taxa de acidentes (TA), que incluiu o índice  $F_{60}$ , e a velocidade operacional da via principal ( $V_1$ ) e da via secundária ( $V_2$ ) como variáveis independentes, apontou que para cada 1% de melhoria condição superficial, uma redução de 7,5% nas taxas de acidentes poderia ser alcançada (Equação 11). Ressalta-se, contudo, que o modelo foi calibrado com 26 observações e validado com apenas 6, apresentando limitações estatísticas.

$$\ln(TA) = 2,63 - 7,466 \cdot F_{60} + 0,018 \cdot V_1 + 0,026 \cdot V_2 \quad (11)$$

Najafi *et al.* (2015) investigaram o efeito do atrito nas taxas de acidentes em vias urbanas. A aderência pneu-pavimento foi quantificada através do ensaio com o equipamento de roda nervurada travada. Análise de Variância (ANOVA) foi executada com nível de confiança de 95%, indicando que a aderência pneu-pavimento é variável significativa para a taxa de acidentes em ambas as condições de pavimento seco e molhado, para diferentes tipos de via (vias principais, rodovias em ambientes urbanos e vias secundárias). Todavia, apesar de ter gerado resultados promissores, a análise foi limitada aos acidentes com severidade elevada, considerando apenas ocorrências com fatalidades e com feridos, não apresentando análise completa dos reais impactos da condição superficial para a segurança viária como um todo.

Em virtude da natureza aleatória e rara dos acidentes e da complexidade da dependência entre os diversos fatores contribuintes dos acidentes de trânsito, obter resultados conclusivos e definitivos da relação entre a condição de atrito superficial e a segurança viária não é uma tarefa trivial. Dentre os estudos levantados nesta pesquisa, constataram-se limitações como bases de dados restritas ou incompletas e complexidade dos registros e ocorrências impossibilitando isolar completamente os efeitos de uma única variável. Além disso, as

possíveis alterações comportamentais dos condutores por vezes desconsideradas podem ter enviesado os resultados obtidos.

Neste contexto, o emprego de ferramentas de análise individual (ou microscópica) do comportamento de condução, permitindo a consideração da variação do processo de condução a depender de estímulos externos, mostra-se como promissora para contribuir com o entendimento destes efeitos na segurança viária. A ferramenta da simulação microscópica de tráfego e a utilização de indicadores que representem eventos mais frequentes e que possibilitem a consideração da condição superficial serão discutidas adiante.

### 3 DESEMPENHO DA SEGURANÇA VIÁRIA E SIMULAÇÃO MICROSCÓPICA

Dando continuidade à revisão bibliográfica, este capítulo discute os meios em que o Desempenho da Segurança Viária (DSV) foi abordado na pesquisa. Existe na literatura divergência sobre o uso de dados históricos de acidentes para avaliações de SV, podendo citar o reduzido tamanho amostral e o caráter reativo destas análises. A Seção 3.1 se propõe a discutir o uso dos conflitos veiculares como forma alternativa de avaliar o DSV. Nesta seção, são apresentados os indicadores *proxy* utilizados para quantificar a severidade dos conflitos veiculares, os quais possibilitam a inclusão da condição superficial discutida anteriormente. Em seguida, discute-se a eficácia do emprego da ferramenta de simulação microscópica de tráfego para avaliar o DSV e quantificar os *surrogate measures of safety* (indicadores alternativos de segurança) (Seção 3.2). Por se tratar de um representante da realidade, os microssimuladores possuem uma série de parâmetros que caracteriza o comportamento microscópico (ou individual) da rede de tráfego. Assim, a Seção 3.3 apresenta estudos cujo objetivo central é a inclusão dos impactos de condições ambientais adversas no processo de condução, o que possibilita a abordagem adotada nesta pesquisa.

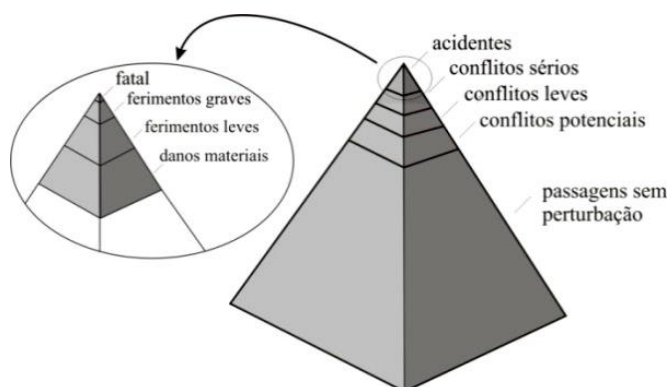
#### 3.1 Conflitos veiculares e indicadores *proxy* de segurança viária

Variadas são as formas de estudar e avaliar o DSV, tendo a avaliação de registros de acidentes ocorridos como uma das vertentes mais recorrentes na literatura. Contudo, a análise através dos acidentes ocorridos, muito úteis em campanhas educativas, apresenta limitações, as quais são discutidas em importantes publicações de segurança viária.

Problemas relacionados aos registros de acidentes, que nem sempre são registrados ou que, por vezes, podem ser registrados de forma incompleta ou com informações equivocadas, são recorrentemente reportados. Também, por se tratar de um evento de natureza multifatorial e rara, a baixa quantidade de registros de determinados tipos de acidentes inviabiliza análises estatísticas adequadas (Hauer e Hakkert, 1989; Chin e Quek, 1997; Farmer, 2003).

Para contornar a limitação da baixa quantidade de registros, bem como contribuir proativamente para a SV, Perkins e Harris (1968) iniciaram os estudos dos conflitos veiculares, definindo-os como uma interação veicular que apresenta potenciais riscos de resultar em uma colisão. Amundsen e Hydén (1977) consolidaram este conceito, definindo-o como interações de tráfego entre dois ou mais veículos que, caso não alterem as velocidades e/ou as direções, resultarão em uma colisão veicular. Hydén (1987) propôs a avaliação da sequência temporal de

ocorrências que culminam em um acidente. Partindo da premissa de que os acidentes resultam de uma série de eventos, desde passagens sem perturbação até conflitos severos, foi elaborado o conceito do *continuum* de segurança (Figura 4).



**Figura 4** – Pirâmide do *Continuum* de Segurança (Hydén, 1987)

Ainda segundo Hydén (1987), os eventos que contribuem para a ocorrência de uma colisão são cronológicos, cuja probabilidade de ocorrência se reduz conforme se eleva a severidade. Este conceito se propõe a avaliar a SV através de todos os fatores que contribuíram para a ocorrência de uma colisão a partir da base da pirâmide do *continuum* até seu topo, conceituando o conflito veicular. Recentemente, El-Basyouny e Sayed (2013) constataram relação proporcional entre a ocorrência de acidentes e de conflitos veiculares, através de dados reais, apontando para a viabilidade dos estudos de SV através da abordagem proativa.

Os conflitos veiculares podem ser categorizados de três formas distintas, a depender do ângulo de interação entre as trajetórias dos veículos conflitantes. Conflitos longitudinais (ou *rear-end*) ocorrem com angulação inferior a 30°; conflitos transversais (ou *crossing*) ocorrem em trajetórias com ângulo superior a 85°; por fim, as demais situações são classificadas como conflitos laterais de mudança de faixa (ou *lane change*) (Gettman e Head, 2003).

Apesar de qualitativamente bem definidos, uma das grandes dificuldades da análise dos conflitos veiculares se tratava da quantificação dessas interações. Fazendo um paralelo com os registros de acidentes, podem-se distinguir situações de apenas danos materiais, passando por leves ferimentos a ferimentos incapacitantes, culminando em óbitos. Desta forma, necessita-se tanto da frequência quanto da severidade dos eventos para as análises de SV, o que resultou na proposição de indicadores *proxy* (ou alternativos) de segurança viária.

Hayward (1972) apresentou um indicador que quantificava o tempo necessário para que um conflito culminasse em uma colisão, caso as trajetórias e velocidades dos veículos permanecessem inalteradas. Nomeado *time to collision* (TTC), o indicador busca medir

continuamente o tempo para colisão, considerando posição e velocidade dos veículos conflitantes (Equação 12), observando o valor crítico de 1,5 s (Van der Horst, 1990). O uso do TTC como indicador de segurança viária permitiu a quantificação da severidade das interações veiculares, uma vez que é considerada a diferença de velocidade entre os veículos conflitantes.

$$TTC_{i,t} = \frac{(X_{i-1,t} - X_{i,t}) - L_{i-1,t}}{V_{i,t} - V_{i-1,t}} \quad (12)$$

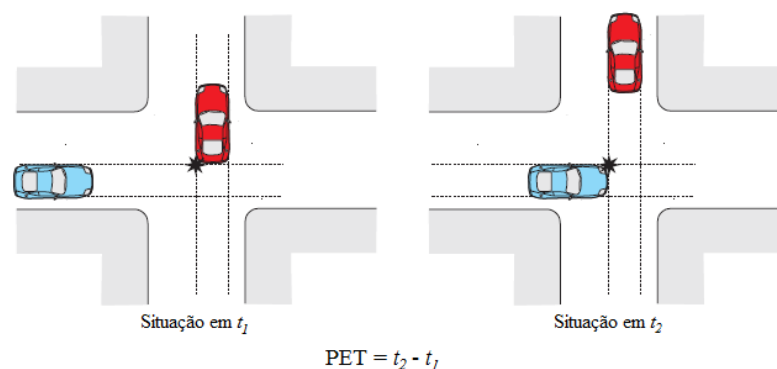
Onde:

$V$ : velocidade dos veículos em conflito ( $i-1$  = veículo líder;  $i$  = veículo seguidor);

$X$ : posição dos veículos em conflito no instante  $t$ ;

$L$ : comprimento os veículos em conflito.

Para superar a necessidade de saber a posição dos veículos em conflito, Cooper (1983) propôs o indicador *post-encroachment time* (PET), definido como a diferença de tempo entre o instante que um veículo conflitante se encontrava em um ponto potencial para colisão e o instante em que outro veículo alcança o mesmo local (Figura 5). Todavia, o PET é mais apropriado para conflitos em interseções, uma vez que os longitudinais têm sua área de conflito em movimento, dificultando a observação em campo. Gettman e Head (2003) adotaram o PET de 5,0 s como limite crítico de um conflito. Apesar de facilitar o cálculo, em relação ao TTC, este indicador não permite a distinção de situações com PET iguais, que podem ocorrer tanto devido à proximidade (ou a aceitação de brechas mais curtas) quanto à diferença de velocidade.



**Figura 5** – Conceito do *Post-Encroachment Time* (Cunto, 2008)

O *deceleration rate to avoid the crash* (DRAC) foi proposto a fim de sobrepor as recorrentes críticas aos indicadores temporais devido à dificuldade de se avaliar a magnitude dos conflitos veiculares. Muito embora baixos valores de TTC indiquem elevadas



probabilidades da ocorrência de uma colisão, não existe relação à severidade desta ocorrência. Cunto (2008) também argumenta que valores iguais de TTC podem representar situações bem diferentes, uma vez que veículos com diferença de velocidade de 100 *km/h* a 42 *m* de distância representam o mesmo TTC de 1,5 segundos de veículos com  $\Delta V$  de 10 *km/h* distando 4,2 *m*. Assim, o DRAC se propõe a incluir a energia cinética envolvida na interação entre veículos conflitantes, quantificando o conflito através da taxa de desaceleração necessária para que não haja uma colisão, conforme a Equação 13 (Cooper e Ferguson, 1976).

$$DRAC_{i,t} = \frac{(V_{i,t} - V_{i-1,t})^2}{2 \cdot [(X_{i-1,t} - X_{i,t}) - L_{i-1,t}]} \quad (13)$$

A proposição destes indicadores *proxy* foi importante pois viabilizou o estudo dos conflitos veiculares como abordagem alternativa à utilização de séries históricas de acidentes. Com isto, não só a frequência dos conflitos era obtida, como, também, as situações de risco de colisões passaram a ser quantificadas. Além da vantagem de sobrepor a necessidade de dados de colisões ocorridas e de permitir análises com tamanho amostral bastante superior, os indicadores *proxy* possibilitam a inclusão de fatores que notoriamente contribuem para minimizar a severidade das interações de tráfego. O DRAC, por exemplo, por se tratar de taxa de frenagem pode ser relacionado à condição superficial de atrito.

Muito embora objetivamente definidos, estes indicadores *proxy* de segurança viária (do inglês, *surrogate measures of safety*) apresentaram dificuldades em seu cálculo, necessitando avanços tecnológicos para minimizar esta limitação. Em campo, a coleta dos dados necessários para quantificá-los pode apresentar registros inconsistentes, com critérios variáveis adotados pelos pesquisadores. Desta forma, mesmo após treinamentos com técnicos capacitados, não se podia afirmar com certeza acerca da inexistência do viés subjetivo da avaliação humana (Chin e Quek, 1997). O emprego de ferramentas que permitam a análise controlada das interações veiculares, fornecendo informações de velocidade e de posição em reduzidos intervalos de tempo, como os microssimuladores de tráfego, tem o potencial de contribuir para a acurácia da determinação dos indicadores *proxy* de SV.

### 3.2 Simulação microscópica de tráfego

Nas últimas duas décadas, a simulação de tráfego surgiu como ferramenta capaz de superar parte das limitações da abordagem proativa dos conflitos veiculares. Sua utilização vem

se tornando cada vez mais frequente para as diversas análises, contribuindo para auxiliar na tomada de decisões em engenharia de tráfego. Os simuladores podem também ser empregados em análises de SV, contribuindo para a identificação de fatores comprometedores do DSV.

A principal vantagem da ferramenta de simulação de tráfego é a possibilidade da obtenção de quantidade superior de dados a serem analisados, além de informações individuais da corrente de tráfego em reduzidos *time-steps*. Todas estas vantagens concentradas em um ambiente controlado, cujo objetivo central é representar fidedignamente a realidade observada em campo, representa um valioso método de avaliação de alternativas de intervenção antes da implantação das mesmas. Em especial, os modelos microscópicos são mais vantajosos, uma vez que estes pacotes podem fornecer outputs das trajetórias de todos os veículos simulados, com as respectivas posições, velocidades e acelerações. Como um benefício direto dos microsimuladores, estes *outputs* facilitam o cálculo dos indicadores *proxy* (Barceló *et al.*, 2003; Huguenin *et al.*, 2005; Cunto, 2008).

Um importante simulador microscópico de tráfego é o alemão VISSIM, da *Planung Transport Verkehr* (PTV). VISSIM é oriundo da sigla *Verkehr In Städten SIMulation* em alemão, traduzido como Modelo de Simulação do Tráfego nas Cidades. Baseado no comportamento de condução em diferentes regimes, são adotados cinco modelos: *i) car-following*, ou veículo seguidor, que representa os movimentos longitudinais; *ii) lane-changing*, que caracteriza o comportamento lateral do condutor em mudança de faixa; *iii) lateral movements*, ou movimentos laterais do condutor inseridos em uma faixa de tráfego; *iv) gap acceptance*, ou aceitação de brecha; e *v) route choice*, ou escolha de rota (PTV, 2014). O VISSIM conta com dois modelos de *car-following*, o *Wiedemann-74* (W74) e o *Wiedemann-91* (W91), sugerindo o primeiro como mais adequado para ambientes urbanos (PTV, 2014). O *car-following* é um dos modelos mais abordados na literatura, isto porque este modelo tem impacto direto no desempenho de variáveis fundamentais de tráfego, como a densidade veicular e a velocidade média de corrente (Lownes e Machemehl, 2006). Neste modelo, a distância (ou *headway*) entre os veículos em *following* pode ser representada tanto quando os veículos estão parados ( $ax$ ) (Equação 14), quanto quando estes estão em movimento, resguardando uma distância de segurança ( $bx$ ) (Equação 15).

$$ax = L + ax_{add} + rndl(I) \cdot ax_{mult} \quad (14)$$

Onde:

$ax$ : distância entre veículos parados em fila [ $m$ ];

$L$ : comprimento veicular [ $m$ ];

$ax_{add}$ ,  $ax_{mult}$ : fatores aditivo e multiplicativo de  $ax$  [ $m$ ];

$rndl(I)$ : variável aleatória normal, média 0,5 e desvio padrão 0,15, entre 0 e 1.

$$bx = [bx_{add} + bx_{mult} \cdot rndl(I)] \cdot \sqrt{v} \quad (15)$$

Onde:

$bx$ : distância de segurança entre veículos em movimento [ $m$ ];

$bx_{add}$ ,  $bx_{mult}$ : fatores aditivo e multiplicativo de  $bx$ ;

$v$ : aproximação, velocidade do líder; distanciamento, velocidade do seguidor [ $m/s$ ].

Para aplicar a ferramenta de simulação microscópica, é necessário que as condições simuladas representem com maior precisão a realidade observada em campo. Desta forma, a calibração dos modelos de simulação é fundamental, pois esta impacta diretamente na qualidade dos resultados extraídos. Sucintamente, esta etapa do processo de modelagem de simulação de tráfego consiste no ajuste do valor dos parâmetros dos modelos comportamentais a fim de representar, com satisfatória similaridade, uma determinada variável simulada e observada em campo. Lacerda (2016) apresenta extensa revisão bibliográfica de diversos esforços empregados, nacional e internacionalmente, na calibração dos microssimuladores de tráfego.

Cunto e Saccomanno (2008) realizaram uma análise de sensibilidade de 13 parâmetros comportamentais do VISSIM, os quais foram selecionados seguindo critérios heurísticos de relevância e impacto nos conflitos longitudinais. Um dos objetivos dos citados autores era avaliar a viabilidade do uso da simulação microscópica nas análises de SV, através de um medidor *proxy* que considera os efeitos do potencial de frenagem. Como resultado, constatou-se forte influência dos parâmetros de *car-following* ( $ax$  e  $bx$ ), além da taxa de desaceleração necessária na ocorrência dos conflitos longitudinais.

Habtemichael e Picardo-Santos (2012) avaliaram 21 parâmetros comportamentais do VISSIM, destes 10 sendo de *car-following* W91, a fim de quantificar os impactos na SV de veículos microssimulados. Na análise de sensibilidade conduzida, foram avaliados 4 níveis para cada um dos parâmetros investigados: mínimo, máximo, default e valor intermediário entre default e mínimo ou máximo. Para cada cenário, foram realizadas 10 simulações com diferentes sementes aleatórias. Quantificou-se o DSV através da frequência de conflitos veiculares, os quais foram extraídos da simulação com o *Surrogate Safety Assessment Model* (SSAM). Além da análise do DSV, avaliou-se o impacto de cada parâmetro no tempo de viagem.

Na variação da frequência dos conflitos microssimulados em relação ao cenário com os parâmetros *default*, Habtemichael e Picardo-Santos (2013) constataram impactos relevantes dos parâmetros CC1 (+877% e -78%), que definem o incremento da distância mínima de *following* devido ao movimento veicular; CC2 (+59% e -33%), espaçamento máximo dos veículos em regime de *following*, na SV; e CC3 (+60% a -31%), que representa o instante em que se inicia a desaceleração do veículo seguidor devido à presença de um veículo líder; os parâmetros CC4 e CC5 são adimensionais e definem os limites das diferenças das velocidades entre os veículos que determinam os momentos de retomada da aceleração e desaceleração do veículo seguidor em *following* impactaram no aumento da frequência de conflitos (+209%). Apesar dos impactos de CC1, CC2, CC4 e CC5 no desempenho operacional, observou-se uma variação mínima e máxima de -5% a +7% no tempo de viagem.

Huang *et al.* (2013) buscaram identificar se os conflitos veiculares microssimulados no VISSIM e extraídos pelo SSAM representam satisfatoriamente o observado em interseções semaforizadas em campo. Para este objetivo, os autores obtiveram 80 horas de filmagem de 10 interseções diferentes. A calibração e a validação da rede focaram no modelo de *car-following* W74 do VISSIM, identificando os parâmetros *ax*, *bx\_add* e *bx\_mult* como mais significativos. Na análise dos resultados, observou-se um erro percentual absoluto médio (EPAM) de 24% na quantidade total de conflitos microssimulados em relação aos observados em campo. Para os conflitos do tipo *rear-end* (ou longitudinais), o EPAM foi de 16%. Na análise de regressão linear, foram obtidos os coeficientes de regressão ( $r^2$ ) de 0,78 para todos os conflitos e de 0,57 para os conflitos longitudinais, o que permitiu aos autores concluir sobre a adequabilidade do uso do VISSIM e do SSAM na representação dos conflitos veiculares em campo.

Em um esforço mais recente, So *et al.* (2016) propuseram abordagens distintas para a previsão de acidentes em interseções de Idaho, Estados Unidos. Dentre elas, os autores utilizaram o SSAM para a extração de conflitos veiculares microssimulados no VISSIM, em uma rede com 40 interseções. A frequência dos conflitos (CF, *crash frequency*) veiculares foi utilizada como variável independente em dois modelos binominais negativos propostos pelos autores: *i*) total de conflitos longitudinais (CL) registrados (Equação 16); e *ii*) total de conflitos longitudinais registrados e volume médio diário anual (VMDA) (Equação 17). Como resultado, a medida de ajuste das modelagens ( $R^2$  de 0,64 e 0,49, respectivamente) permitiu a conclusão de que os conflitos veiculares se mostraram satisfatórios na predição dos acidentes. Os autores ressaltam, contudo, que a modelagem requereu esforços grandes e que nem sempre os modelos podem ser replicados para outras localidades sem a devida calibração dos parâmetros comportamentais.

$$CF_1 = e^{-1,62} \cdot C_L^{0,38} \quad (16)$$

$$CF_2 = e^{-3,814} \cdot VMDA_{PRINCIPAL}^{0,231} \cdot VMDA_{SECUNDÁRIA}^{0,241} \cdot C_L^{0,369} \quad (17)$$

Diversos estudos nas últimas duas décadas utilizaram a ferramenta de simulação microscópica nas análises de segurança viária. Young *et al.* (2014) apresentam um estado-da-arte do emprego de modelos computacionais para simular e avaliar os níveis de segurança em situações existentes e em análises de cenários futuros.

Entendendo que os simuladores de tráfego representam o comportamento microscópico da corrente veicular (ou seja, cada veículo individualmente), fatores externos, além do tráfego, podem influenciar diretamente no processo de condução. Apesar deste entendimento conceitual, a avaliação do impacto da condição ambiental com o uso da microsimulação apresenta algumas dificuldades, principalmente relacionadas à representação da provável diferença de comportamento em dias de chuva, por exemplo.

### 3.3 Impacto das condições climáticas adversas no comportamento de condução

Inseridos no contexto desta pesquisa, buscou-se captar o impacto das condições climáticas adversas no comportamento dos condutores e incorporá-los em microsimulações de tráfego. Zhang *et al.* (2005), Billot *et al.* (2009) e Hou *et al.* (2013) apontaram variação da Velocidade de Fluxo Livre (VFL) em dias chuvosos. Segundo estes autores, os condutores tendem a ser mais cautelosos na chuva, reduzindo a velocidade e aumentando a distância ao veículo da frente. Rakha *et al.* (2009) e Asamer *et al.* (2013) também verificaram que, na chuva, os motoristas resguardam maiores distâncias em *following*, possibilitando utilizar o Fluxo de Saturação (FS) como medida-alvo da calibração.

Zhang *et al.* (2005) buscaram identificar de que forma seria possível incorporar a variação comportamental dos condutores através dos parâmetros de simuladores de tráfego. Em simulações de 1 hora de duração no *CORridor SIMulation* (CORSIM), 23 parâmetros comportamentais em cinco condições urbanas foram avaliados. Variando cada parâmetro por vez, nos valores default e em outros quatro níveis de magnitude, convergindo para um comportamento mais conservador devido aos efeitos da chuva, os autores identificaram que a alteração da VFL apresentava significativo impacto no desempenho das redes simuladas. Outros fatores tiveram forte implicação na representação da adversidade climática: tempo de reação à desaceleração do veículo líder, *headway* médio de descarga e atraso inicial médio.

Agarwal *et al.* (2006) utilizaram dados de tráfego avaliados durante quatro anos, obtidos através de laços magnéticos, no intuito de avaliar os impactos da condição climática no desempenho operacional de segmentos rodoviários. Os registros de precipitação foram agrupados em quatro categorias distintas de intensidade (sem chuva; neblina, menor que 0,25 mm/h; chuva leve, entre 0,25 e 6,35 mm/h; e chuva intensa, maior que 6,35 mm/h). As amostras foram testadas estatisticamente através do método de *Bonferroni* ( $\alpha$  de 0,05), escolhido por permitir a comparação de amostras diferentes sem assumir a equidade da variância. Constatou-se estatisticamente a redução na capacidade viária do segmento avaliado entre 1 e 3%, 5 e 10% e 10 e 17% para chuvas leves, moderadas e intensas, respectivamente. Também, reduções na velocidade de tráfego foram registradas entre 1% e 7%, conforme se intensificava a precipitação. Contudo, as análises apontaram que a diferença na velocidade média para chuvas leves e intensas não eram estatisticamente significantes, o que pode representar que o comportamento dos condutores depende apenas da incidência ou não da chuva, a despeito de sua intensidade.

Rakha *et al.* (2008) buscaram quantificar as implicações de precipitações no comportamento da corrente de tráfego, através dos parâmetros de VFL, velocidade na capacidade, capacidade e índice de congestionamento. Dados de tráfego de três cidades distintas foram obtidos de laços magnéticos instalados no pavimento, juntamente com registros de precipitações nos segmentos pesquisados, agrupados em três classes a depender da intensidade da chuva. Dentre os resultados obtidos, foi constatada uma redução de 2% a 3,6% na VFL, com a incidência de chuvas leves ( $< 0,01$  cm/h), atingindo até 6% a 9% de redução para chuvas intensas ( $> 1,6$  cm/h).

Billot *et al.* (2009) propuseram uma metodologia para analisar os impactos da chuva no comportamento dos condutores, além de terem conduzido um estudo de caso em um trecho de rodovia francesa, cujo limite de velocidade é de 110 km/h. Os dados de tráfego, obtidos através de laços detectores, foram agrupados em três classes distintas de incidência de chuva: i) sem chuva; ii) chuva leve, com precipitação até 2 mm/h; iii) chuva média, com precipitação de 2 a 3 mm/h. Na análise preliminar dos dados, os autores já puderam constatar uma redução do fluxo veicular, conforme se aumentava a intensidade da chuva. Além disso, também constataram a redução da frequência de velocidades elevadas, bem como um aumento na frequência dos *headways* maiores conforme se agravava a chuva (Figura 6).

Asamer *et al.* (2011) buscaram identificar os efeitos das condições ambientais no FS de vias urbanas austríacas, segregando os dados em quatro categorias, a depender da intensidade da chuva (leve ou intensa) e da ocorrência de nevascas (com ou sem neve). Os autores obtiveram os dados através de equipamentos de filmagem de três regiões distintas de

Viena (L1, L2 e L3), computando os *headways* manualmente. A Figura 7 apresenta os resultados médios e seus respectivos desvios padrão obtidos pelos autores, apresentando uma tendência de redução do FS em condições adversas ambientais. A Tabela 3 compila as reduções de FS observadas pelos autores.

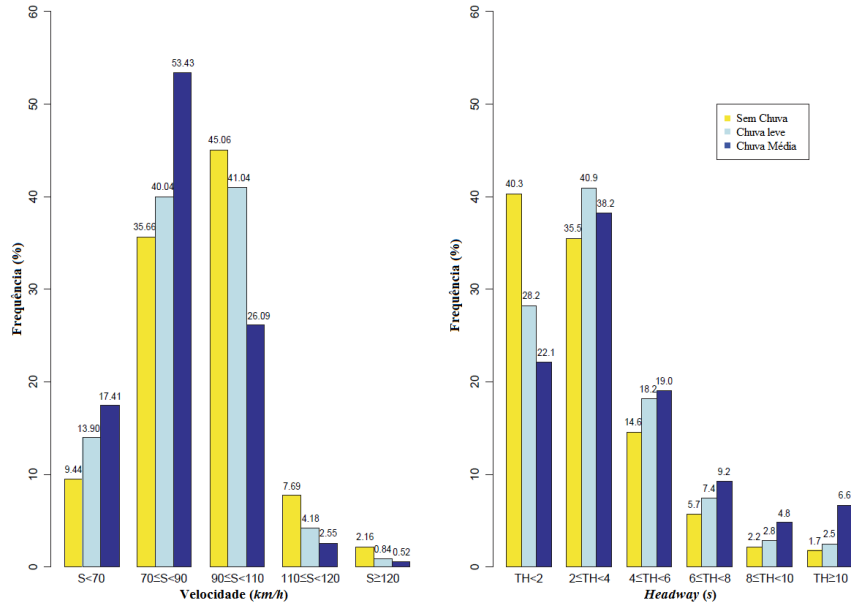


Figura 6 – Distribuição da Velocidade e do *Headway* para Variada Intensidade de Chuva (Billot *et al.*, 2009)

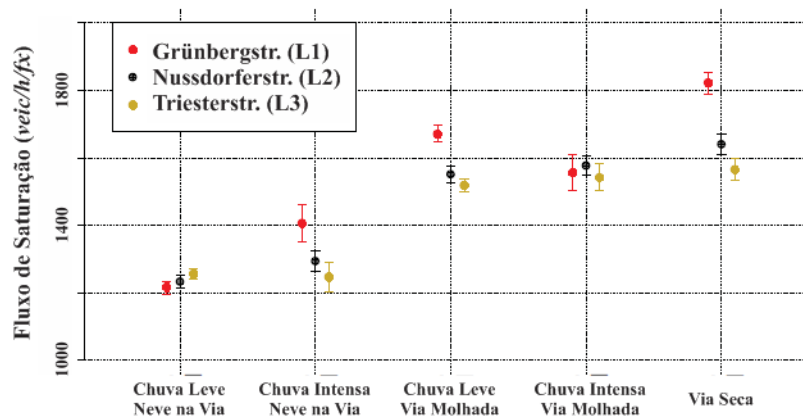


Figura 7 – Comparação do Fluxo de Saturação para as Condições Adversas Avaliadas (Asamer *et al.*, 2011)

Tabela 3 – Redução do Fluxo de Saturação nas Condições Adversas Avaliadas (Asamer *et al.*, 2011)

Condição Climática	Redução do FS (%)		
	L1 (1.821 veic/h/fx)	L2 (1.641 veic/h/fx)	L3 (1.565 veic/h/fx)
Chuva Intensa (Via Molhada)	14,8%	4,0%	1,5%
Chuva Leve (Via Molhada)	8,3%	5,5%	3,0%
Chuva Intensa (Via com Neve)	22,8%	21,1%	20,3%
Chuva Leve (Via com Neve)	33,2%	24,9%	19,8%

Asamer *et al.* (2013) propuseram uma calibração dos parâmetros de *car-following* do VISSIM para representar a condição de vias com neve na superfície, típica condição adversa em países com invernos rigorosos. Foram coletados dados de três interseções diferentes, durante três dias, em que se pôde observar a redução das medidas de desempenho avaliadas FS e atraso inicial, apresentados pela média e pelo desvio padrão (entre parênteses) na Tabela 4. No microssimulador, os autores avaliaram uma seção de 3 faixas de uma via de 500 m com uma interseção semaforizadas, em simulações de 1.800 s. Pela análise de sensibilidade conduzida pelos autores, velocidade desejada, aceleração desejada e distância mínima de *following* ( $bx\_add$  e  $bx\_mult$ ) foram identificados como parâmetros que influenciam tanto no FS quanto no atraso inicial.

**Tabela 4** – Fluxo de Saturação e Atraso Inicial para Pavimento com Neve e Seco (Asamer *et al.*, 2013)

Interseção	Fluxo de Saturação (veic/h/fx)		Atraso Inicial (s)	
	Com Neve	Seco	Com Neve	Seco
1	1.215 (20)	1.821 (32)	2,32 (0,20)	2,29 (0,15)
2	1.233 (20)	1.640 (30)	1,96 (0,19)	1,59 (0,19)
3	1.255 (15)	1.565 (32)	2,02 (0,16)	2,17 (0,21)

Khavas *et al.* (2017) se propuseram a representar, no VISSIM, os efeitos da condição ambiental no comportamento do condutor através da calibração dos parâmetros de condução. Revisão da literatura conduzida pelos autores resultou na listagem de 21 parâmetros susceptíveis à variação da condição ambiental. Após a análise de sensibilidade, 11 parâmetros comportamentais do VISSIM foram avaliados pelos autores. Foram avaliados 3 cenários ambientais relacionadas à condição da superfície e ao tipo de precipitação, a partir de dados obtidos de um único segmento de rodovia com duas faixas de tráfego: *i*) superfície com neve e sem precipitação; *ii*) superfície seca e com precipitação de neve; e *iii*) superfície molhada e com precipitação de neve. Os três cenários foram caracterizados pelas variáveis macroscópicas da corrente de tráfego de velocidade de fluxo livre ( $u_f$ ), velocidade na capacidade ( $u_c$ ) e capacidade ( $q_c$ ) como medidas-alvo de simulação. Como resultado, os parâmetros CC0 e CC1 do modelo de *car-following* W99 foram os mais susceptíveis às variações ambientais, registrando os maiores valores no cenário de superfície molhada e com precipitação de neve, sendo 18% e 238% superior, respectivamente, em relação à superfície seca.

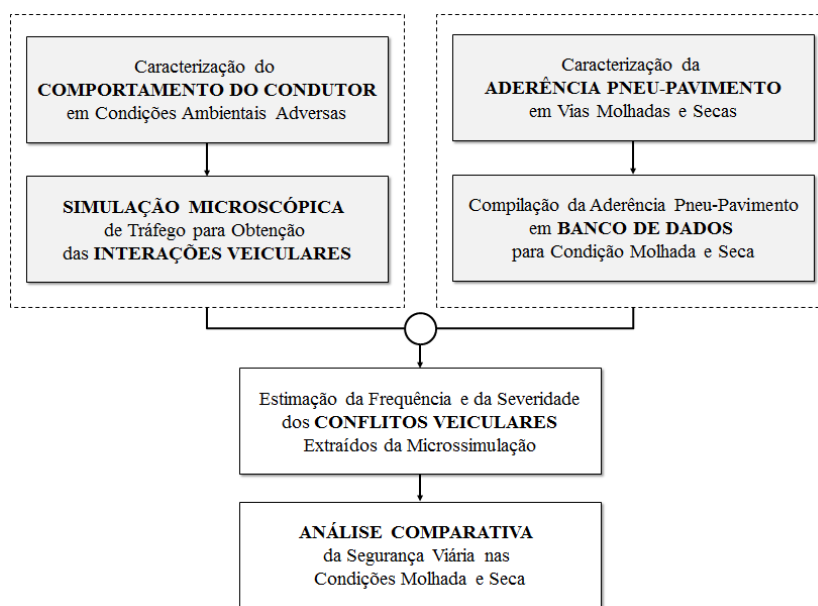
Em resumo, pela revisão da bibliografia levantada, constatou-se a relevância da condição superficial contribuindo positivamente com a segurança viária. Em especial, na condição de vias molhadas devido à ocorrência de chuvas, o papel desempenhado pela



aderência pneu-pavimento se torna ainda mais proeminente na mitigação dos riscos de colisões e na redução da severidade de conflitos veiculares. Esta forma de análise da segurança viária, discutida mais intensamente nas duas últimas décadas na literatura mundial, também se mostrou relevante e acurada nos estudos de SV, sendo, inclusive, criada a sessão *Surrogate Measures of Safety* no *Transportation Research Board* (TRB). A partir dos indicadores *proxy* de SV, que quantificam os conflitos veiculares, possibilita-se a inclusão de fatores comportamentais dos condutores e os impactos de condições externas no processo de condução veicular. Em dias chuvosos, por exemplo, a literatura converge para a avaliação do FS e da VFL a fim de captar essa variação devido às externalidades. Por fim, esta inclusão de variação comportamental se mostrou viável, através do uso da ferramenta de simulação microscópica de tráfego.

## 4 METODOLOGIA

Neste capítulo, as etapas metodológicas definidas no intuito de responder às questões de pesquisa deste trabalho, bem como atingir os objetivos traçados são apresentadas. A Figura 8 apresenta o fluxograma das seis etapas propostas nesta pesquisa.



**Figura 8** – Metodologia proposta

### 4.1 Caracterização do comportamento do condutor em condições ambientais adversas

Neste tópico, os parâmetros-chave relacionados à variação climática são apresentados, no intuito de representar o comportamento dos condutores. Pelo escopo desta pesquisa de obter as interações veiculares através da ferramenta de microssimulação, buscou-se identificar de que forma é possível incluir a ocorrência de chuva, uma vez que os microssimuladores não distinguem condições ambientais adversas.

A partir da disponibilidade de dados, obtidos do Controle de Tráfego em Área de Fortaleza (CTAFOR), respaldado também na literatura, que aponta para a relação teórica destes parâmetros-chave determinados com o comportamento dos condutores, selecionaram-se Fluxo de Saturação (FS) e Velocidade de Fluxo Livre (VFL). Os métodos adotados para quantificá-los e para incorporá-los no simulador microscópico de tráfego VISSIM 8.0 também foram apresentados nesta seção. O FS, que se trata de uma medida de desempenho de operação, foi representado através da calibração dos parâmetros comportamentais do software. Já a VFL foi

considerada como um importante dado de entrada, tendo diretas implicações nas medidas de desempenho de operação.

#### 4.1.1 Headway e fluxo de saturação

O *Highway Capacity Manual* (HCM), da *Transportation Research Board* (TRB, 2010), e o Manual de Sinalização Semafórica, do Departamento Nacional de Trânsito (DENATRAN, 2014), definem FS como a quantidade máxima de veículos que um determinado semáforo consegue escoar em períodos saturados, considerando uma grande duração de verde (1 hora). Pela definição, FS é a máxima taxa de fluxo de tráfego, em torno de 1.600 a 2.000 veículos por hora, a qual pode ser expressa na relação de segundos em uma hora pelo *headway* de saturação ( $h_s$ ) (Equação 18). O método adotado nesta pesquisa para determinar FS seguiu o Apêndice 6 (DENATRAN, 2014), também adotado pelo HCM (TRB, 2010).

$$FS \text{ (veic/h)} = \frac{3.600 \text{ (s/h)}}{h \text{ (s/veic)}} \quad (18)$$

Pelo contexto desta pesquisa, partiu-se da premissa que os *headways* veiculares podem ser diferentes em condições ambientais adversas. Contudo, determinar FS *in loco* em dias chuvosos pode apresentar duas dificuldades relevantes. Primeiramente, quanto à imprevisibilidade da ocorrência das chuvas, o que dificulta e limita a programação das pesquisas em campo. Também, quanto à indesejada exposição às intempéries ambientais dos próprios técnicos em cargo da pesquisa de campo.

Desta forma, concebeu-se uma alternativa para obter o FS através dos equipamentos de videomonitoramento gerenciados pelo CTAFOR. O banco de dados do CTAFOR permite o armazenamento das filmagens das 34 câmeras por até 10 dias. Assim, foi possível vencer todas as impedâncias citadas anteriormente. Avaliaram-se filmagens de dias úteis típicos, no período de pico matinal, para ambas as condições com e sem chuva. Como critério para a seleção dos equipamentos de fiscalização eletrônica, o foco semafórico, a faixa de retenção e a extensão da fila veicular devem estar visíveis. A influência das interseções logo à jusante foi outro critério considerado, tendo em vista que interseções com pontos de interrupção recorrente à jusante tendem a influenciar nos valores de  $h_s$  – consequentemente, no FS.

Com o auxílio do *FreeStopWatch*, *headways* veiculares e instantes de mudança de estágio (vermelho e verde) foram registrados. Os registros, feitos para cada faixa de tráfego,

foram compilados em planilha, identificando mudanças de estágio para a determinação do  $h_s$  por ciclo. Seguindo as diretrizes do método do Apêndice 6 do Manual do DENATRAN (2014), apenas estágios com 6 veículos em fila foram considerados, excluindo os demais do cálculo. *Headways* veiculares acima de 4,0 s foram considerados como dispersão da fila (outro pelotão atendido pelo mesmo estágio), sendo desconsiderados do cálculo do  $h_s$  do ciclo.

Como se aplicou o método por faixa de tráfego, considerou-se que os movimentos permitidos influenciariam no comportamento dos condutores. Desta forma, avaliou-se o  $h_s$  para cada agrupamento no intuito de observar a variação para cada condição avaliada. Em seguida, análise estatística descritiva dos resultados foi conduzida (média, desvio padrão e coeficiente de variação) a fim de constatar os efeitos da condição ambiental nos condutores.

Por fim, executou-se teste de hipótese  $t$  (unicaudal) com grau de confiança de 95%. Partindo da premissa da normalidade amostral, testou-se a hipótese nula de igualdade das médias no intuito de avaliar o efeito da condição ambiental no comportamento do condutor quanto ao desenvolvimento de velocidade.

#### ***4.1.2 Velocidade de fluxo livre***

A velocidade de fluxo livre (VFL) é definida no HCM (TRB, 2010) como a velocidade média veicular em um segmento, medida na condição de baixo tráfego. O indicador é considerado nas ocasiões em que não há impedâncias para o desenvolvimento da velocidade, como intenso fluxo veicular e/ou existência de equipamentos controladores de tráfego, como semáforos ou sinalização indicativa de “Pare”.

Diante das dificuldades de se coletar a VFL em campo pelos métodos tradicionais (veículo-teste, *pocket* radar e coleta de placas), foram utilizadas informações da fiscalização eletrônica. Outro benefício do uso dos dados dos fotossensores é o extenso tamanho amostral, o qual se atingiria pelos métodos tradicionais com muitas horas de trabalho de campo. Além disso, estes dados são mais favoráveis ainda quando se pensa na determinação da VFL em dias chuvosos, uma vez que a exposição às intempéries ambientais é eliminada.

Praticamente, todo veículo que passa por um fotossensor é registrado; inclusive, com um aproveitamento médio de 50 a 60%, os equipamentos reconhecem as placas dos veículos, gerando caracteres aleatórios para cada veículo, armazenando-as nos servidores do CTAFOR. Os dados são armazenados de forma desagregada, ou seja, toda passagem é registrada com todos os parâmetros apresentados na Tabela 5.

**Tabela 5** – *Layout* do arquivo de dados gerados pelos fotossensores

<b>Campo</b>	<b>Descrição</b>	<b>Formato</b>	<b>Exemplo</b>
<i>cod_equipamento</i>	Código único do equipamento	Numérico	233001
<i>data</i>	Data da passagem	AAAA-MM-DD	22/01/2011
<i>hora</i>	Hora da passagem	HH:MM:SS	10:34:29
<i>faixa</i>	Faixa de rolamento	Numérico	2
<i>velocidade_permitida</i>	Velocidade permitida da via (km/h)	Numérico	60
<i>velocidade_medida</i>	Velocidade na passagem (km/h)	Numérico	58,0
<i>tamanho</i>	Comprimento veicular (m)	Numérico	3,4
<i>perfil</i>	Tipo veicular	Numérico	3
<i>placa</i>	Placa do veículo	Alfanumérico	ABC1234

<b>Código</b>	0	1	2	3	4
<b>Descrição</b>	Tamanho Indefinido	Motocicleta	Veículo de Passeio	Caminhão	Ônibus

Foram utilizados dados gerados pelos equipamentos de fiscalização para a VFL, partindo de pares de fotossensores subsequentes. Pelos registros das placas e dos instantes em que os veículos passam pelos equipamentos, possibilita-se a determinação do tempo de viagem e, conhecendo a distância entre os equipamentos, conseqüentemente, a velocidade média no espaço ( $\bar{\mu}_s$ ). Entende-se que a presença dos equipamentos de fiscalização eletrônica possa induzir ajustes comportamentais nos condutores, que reduzem suas velocidades para evitar o registro da infração; entretanto, tem-se o entendimento de que os condutores mais agressivos tornam a ajustar suas velocidades após passarem pelo equipamento, apesar de estarem cometendo uma infração. Desta forma, este ajuste comportamental se minimiza pela  $\bar{\mu}_s$ .

Para selecionar o pareamento de fotossensores, buscaram-se trechos de vias urbanas que apresentavam dois equipamentos subsequentes, com geometria (largura e quantidade de faixas) do trecho constante, bem como ausência de equipamentos de controle de tráfego (semáforos) ou interseções não-sematizadas. Outro critério adotado, devido à proposta de avaliar, também, a condição em períodos chuvosos, foi a proximidade em um raio de até 5 km de distância do local onde os dados de precipitações são registrados. Com os pares definidos, as distâncias entre os fotossensores foram obtidas pelo *Google Earth Pro*. Definidos os trechos a serem investigados, analisaram-se os dados registrados pelos equipamentos de fiscalização eletrônica, no intuito de avaliar se o volume veicular poderia ser classificado como baixo o suficiente, operando em fluxo livre. Para esta avaliação, considerou-se que o fluxo veicular de até 300 *veic/h/fx* poderia ser considerado como de fluxo livre.

Para avaliar os períodos das chuvas, bem como suas intensidades, foram necessários dados desagregados das precipitações em Fortaleza. Instalada no *campus* da Universidade

Estadual do Ceará (UECE), a Plataforma de Coleta de Dados (PCD) da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (Funceme) registra e armazena dados de pluviometria em milímetros precipitados. Apenas chuvas acima de  $1,0 \text{ mm/h}$  foram consideradas como eventos de impacto no comportamento do condutor e na condição escorregadia do pavimento. Em seguida, as precipitações foram agrupadas nas faixas propostas por Billot *et al.* (2009): *i*) leve, abaixo de  $2,0 \text{ mm/h}$ ; *ii*) moderada, de  $2,0$  a  $3,0 \text{ mm/h}$ ; e *iii*) intensa, acima de  $3,0 \text{ mm/h}$ . Além destas, registros pluviométricos de  $0,0 \text{ mm/h}$  também foram avaliados, sorteando aleatoriamente a mesma quantidade de horas chuvosas para a classe de condição seca.

Após a primeira rodada de filtragem dos dados pela intensidade de precipitação, desenvolveu-se uma rotina em *python* para facilitar a organização e a análise dos resultados. O código funciona como um processo de pareamento de veículos cujas placas ofuscadas foram registradas nos fotossensores do par em análise. Em seguida, a rotina determina a diferença entre os instantes em que as placas ofuscadas foram registradas em cada equipamento. De posse dos resultados, análise estatística conduzida para o *headway* de saturação (Seção 4.1.1) foi conduzida para a VFL. Figura 9 apresenta fluxograma exemplificando as etapas metodológicas.

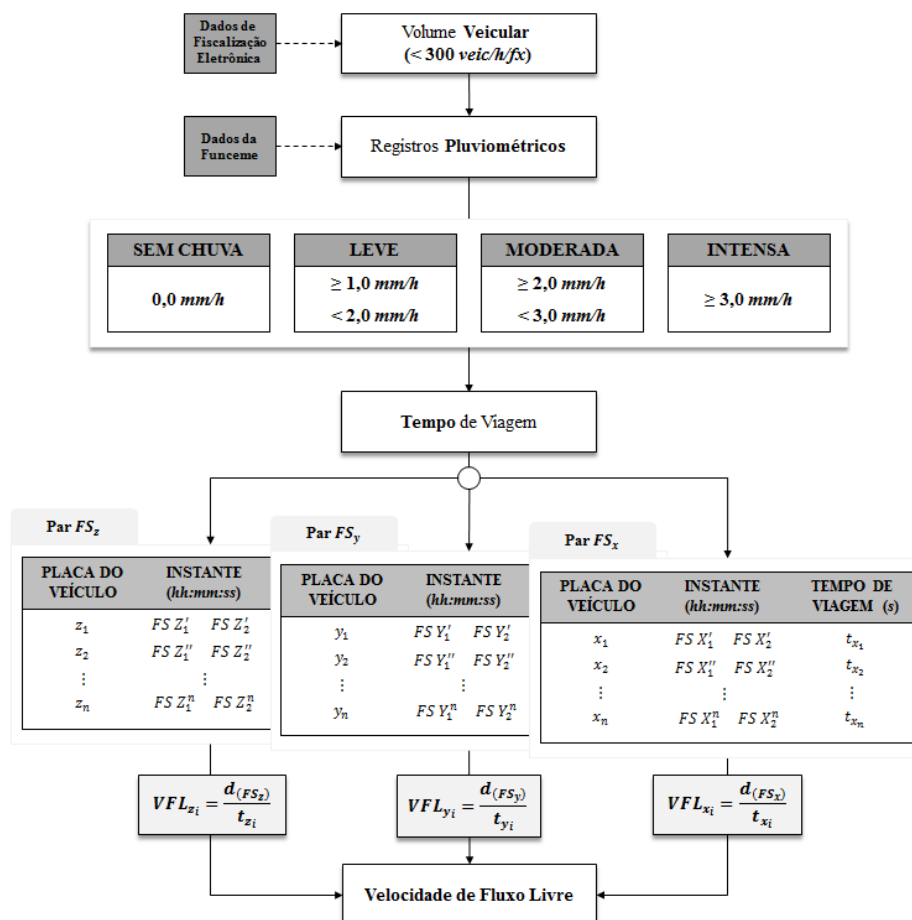


Figura 9 – Etapas metodológicas da determinação da velocidade de fluxo livre

## 4.2 Simulação microscópica de tráfego para obtenção das interações veiculares

Recorreu-se ao emprego da ferramenta da simulação microscópica para contornar as dificuldades da avaliação do DSV *in loco*, sendo utilizado o *software* VISSIM 8.0 da PTV. Dividida em três etapas, esta seção explica as etapas metodológicas para a aplicação microsimulador. Primeiramente, caracterizou-se a rede típica modelada no VISSIM 8.0 (4.2.1); em seguida, definiram-se os parâmetros dos modelos comportamentais a serem calibrados (4.2.2). Por fim, abordou-se o método para a incorporação dos efeitos da variação ambiental na simulação do comportamento do condutor (4.2.3).

### 4.2.1 Caracterização da rede típica para microsimulação

Com o objetivo de captar os efeitos da variação da condição ambiental no comportamento do condutor de contexto urbano, buscou-se representar um corredor típico de Fortaleza/CE no VISSIM 8.0. Foram identificadas vinte vias arteriais com características similares pela cidade: sentido duplo separado por canteiro central, duas faixas de tráfego misto por sentido e presença de interseções semaforizadas e não-semaforizadas, as quais foram consideradas para a modelagem do corredor-típico.

O simulador requer alguns parâmetros básicos de entrada para a modelagem de redes: *i*) volume veicular; *ii*) classificação veicular; *iii*) taxa de conversão; *iv*) tempos semafóricos; e *v*) transporte público. É válido fazer a ressalva que com a exceção das paradas de ônibus, as demais quatro informações variam conforme a demanda veicular – dessa forma, foram considerados quatro cenários de volume veicular, os quais serão apresentados em seguida.

Para quantificar volume veicular e proporção de tipos veiculares, utilizou-se a base de dados do CTAFOR, a qual passa por um processo de agregação para representar a corrente em intervalos de 15 minutos. Ao todo, são obtidas 28 diferentes variáveis e informações para cada incremento de tempo – como data, hora, equipamento, período, volume veicular por modo, comprimento veicular, velocidade, fluxo e densidade veicular.

O CTAFOR também conta com dados de contagens veiculares em interseções de toda a cidade de Fortaleza, utilizada para a determinação de taxas típicas de conversão; também, responsável pelo gerenciamento dos 820 semáforos da cidade, há disponível os dados de tempos semafóricos. Os locais dos pontos de parada de transporte público são disponibilizados em SIG pela Empresa de Transporte Urbana de Fortaleza (ETUFOR).

#### 4.2.1.1 Volume veicular

Foram analisados os volumes veiculares registrados nos equipamentos de fiscalização eletrônica em diferentes pontos das vinte vias arteriais características de Fortaleza. Braga (2016) avaliou a qualidade da coleta e da classificação dos dados de fluxo veicular dos laços indutivos do sistema de fiscalização eletrônica de Fortaleza. Na pesquisa, o autor conduziu uma análise comparativa de 10 locais distintos, comparando os resultados de contagem manual através de filmagens e os resultados obtidos a partir do uso dos equipamentos. Como resultado, o autor verificou uma subestimação da contagem dos laços indutivos em relação à realidade em média de 9% para carros, de 37% para motocicletas, de 74% para caminhões e de 57% para ônibus. Essas taxas foram adotadas nesta pesquisa, no intuito de minimizar os efeitos da subestimação do volume veicular observado na realidade.

Na modelagem da rede de tráfego para representar um corredor arterial tipicamente urbano de Fortaleza/CE, foram considerados quatro tipos de cruzamentos característicos da realidade local: *i*) com via local; *ii*) com via coletora; *iii*) com via arterial; e *iv*) com via arterial de alta capacidade (vias com três ou mais faixas de tráfego por sentido). Na representação do fluxo veicular, foram adotadas quatro faixas de demanda na simulação do corredor arterial típico, classificadas como alta (1.200 *veic/h*), média (900 *veic/h*), baixa (600 *veic/h*) e muito baixa (300 *veic/h*). Independente do cenário de demanda, caracterizou-se o volume veicular das vias locais, coletoras e arteriais de alta capacidade como 5%, 50% e 150% do fluxo na arterial típica, respectivamente.

A partir dos dados de fiscalização eletrônica, aplicando os fatores de correção propostos por Braga (2016), observou-se a composição do tráfego veicular com: *i*) 75% de automóveis; *ii*) 15% de motocicletas; *iii*) 5% de caminhões; e *iv*) 5% de ônibus. Apesar da significativa presença no fluxo veicular, as motocicletas não foram representadas na simulação desta pesquisa. Baseado no comportamento geral dos motociclistas, entende-se que os impactos deste modo de transporte nos conflitos veiculares longitudinais não são significantes em comparação com os demais modos. Além disso, foge do escopo desta pesquisa a representação do comportamento deste modo de transporte nas vias urbanas de Fortaleza, o que requer esforços mais aprofundados de calibração e de validação. Os ônibus foram incorporados na microsimulação através da inclusão de linhas de transporte público, o que será discutido a *posteriori*. Assim, considerou-se o rateio de 95% de automóveis e 5% de veículos pesados (caminhões) em todos os cenários de simulação.



O parâmetro *desired speed* (ou velocidade desejada) foi considerado como *input* da modelagem. Foram adotadas as faixas sugeridas por Lacerda (2016) de 50 *km/h* para automóveis particulares e de 40 *km/h* para veículos pesados (ônibus e caminhões).

#### 4.2.1.2 Taxa de conversão

Para a determinação das taxas de conversão típicas, foram avaliadas 30 pesquisas volumétricas da base de dados do CTAFOR. Com base nessas pesquisas, foram consideradas taxas médias de conversão a depender do tipo de interseção (Tabela 6).

**Tabela 6** – Taxas de conversão adotadas por cruzamento

Aproximação	Norte			Sul			Leste			Oeste		
	↖	↑	↗	↖	↑	↗	↖	↑	↗	↖	↑	↗
<b>Local</b>	-	-	100%	-	-	100%	-	90%	10%	-	90%	10%
<b>Coletora</b>	15%	70%	15%	15%	70%	15%	-	80%	20%	-	80%	20%
<b>Arterial</b>	-	80%	20%	-	80%	20%	-	80%	20%	-	80%	20%
<b>Alta Capacidade</b>	15%	70%	15%	15%	70%	15%	-	70%	30%	-	70%	15%

#### 4.2.1.3 Tempos semafóricos

Para a programação semafórica, escolheu-se um trecho de 1,5 *km* de uma via arterial típica de Fortaleza. Fez-se essa ressalva no intuito de incorporar a programação semafórica de um corredor considerando as defasagens, que contribuem para otimizar a circulação viária. Selecionou-se o trecho da Av. Virgílio Távora, entre as avenidas Antônio Sales e Dom Luís, o qual apresenta 14 interseções, sendo destas 9 semaforizadas.

#### 4.2.1.4 Transporte público

Na modelagem dos pontos de parada de transporte público na rede de simulação, foram avaliadas as vinte vias arteriais com características similares, registrando a quantidade de paradas de ônibus lindeiras e a extensão de cada uma delas. Com estas informações, para uma via arterial típica de Fortaleza, obteve-se a taxa média de 6,3 paradas por *km*. Considerando o corredor modelado no simulador de 1,5 *km* de extensão, foram alocadas 10 paradas de ônibus no simulador, uniformemente espaçadas.

Quanto às linhas de transporte público, considerou-se que todas cruzam a totalidade do trecho modelado no Microssimulador VISSIM, em ambos os sentidos sul-norte e norte-sul. Em cada cenário de simulação, considerou-se um acréscimo de 5% no fluxo veicular oriundo destas linhas de transporte público.

#### 4.2.2 Calibração dos parâmetros comportamentais do VISSIM

Nesta seção, serão apresentados os parâmetros comportamentais do VISSIM que foram avaliados, além da medida de desempenho escolhida e da medida de ajuste avaliada. O objetivo desta etapa metodológica, reconhecidas as suposições e as simplificações adotadas, é avaliar se a rede modelada no microssimulador representa satisfatoriamente a realidade de campo – ou seja, realizou-se uma calibração dos parâmetros selecionados.

Baseado na revisão da literatura, escolheu-se o FS como medida-alvo desta etapa de calibração. Conseqüentemente, por impactarem diretamente tanto na dispersão quanto na formação de filas, foram considerados os parâmetros comportamentais do modelo de *car-following* W74 do VISSIM 8.0 ( $ax$ ,  $bx\_add$  e  $bx\_mult$ ).

Foram coletados *headway* veicular no período de pico para uma faixa de tráfego em um corredor tipicamente urbano de Fortaleza, conforme determinado na Seção anterior. As coletas foram realizadas no pico da manhã de dois dias úteis típicos, em condições ambientais normais (ou seja, sem chuva), no intuito de obter, pelo menos, trinta observações. Com estas informações, determinou-se o *headway* de saturação ( $h_s$ ) e, conseqüentemente, o FS (Seção 4.1.1). Na comparação dos resultados simulados com a realidade de campo, adotou-se o erro percentual (EP) do FS<sub>SIM</sub> ( $x_i$ ) em relação ao FS<sub>CAMPO</sub> ( $y_i$ ) como medida de ajuste (Equação 19).

$$EP = 100\% \cdot \frac{x_i - y_i}{y_i} \quad (19)$$

Nesta etapa, considerou-se o volume veicular de 3000 veículos nas entradas da rede, no intuito de representar uma demanda “infinita”. Foram realizadas 10 simulações de 4.200 segundos, considerando 600 segundos como período de aquecimento da rede. Primeiramente, avaliou-se o comportamento da rede modelada com os parâmetros *default* do VISSIM 8.0 ( $ax = bx\_add = 2,0$ ;  $bx\_mult = 3,0$ ), quantificando o EP em relação aos dados coletados de campo.

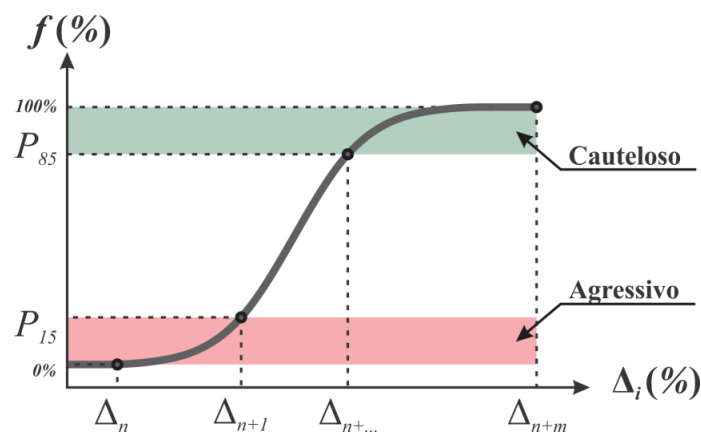
Lacerda (2016) calibrou alguns parâmetros comportamentais no VISSIM, utilizando duas vias tipicamente urbanas de Fortaleza. Estes valores ( $ax = 2,2$ ;  $bx\_add =$

$bx\_mult = 5,0$ ) foram utilizados como uma primeira tentativa de representar a realidade observada. O EP de 5% foi considerado aceitável para a calibração; caso não haja ajuste, por representarem o movimento de perseguição, foram variados os parâmetros  $bx\_add$  e  $bx\_mult$ . É válido ressaltar que se considerou  $bx\_add = bx\_mult$ , adotando o mesmo valor para ambas.

#### 4.2.3 Incorporação da variação da condição ambiental no microsimulação

Conforme revisão bibliográfica, os principais parâmetros influenciados pelas condições climáticas adversas são FS e VFL, obtidos conforme apresentado na Seção 4.1 para dias com e sem chuva. Assim, partindo dos resultados obtidos, representou-se a incidência das precipitações pela esperada redução (caso esta seja estatisticamente significativa) percentual de ambos os valores médios. Esta variação foi representada tanto pela calibração quanto pelo *input* de parâmetros comportamentais na simulação microscópica de tráfego.

Foram considerados dois tipos de reação à presença da chuva no processo de condução, nomeados “agressivo” e “cauteloso”. Foram considerados o 15º percentil e o 85º percentil das diferenças percentuais médias ( $\Delta_i$ ) para caracterizar os condutores “agressivos” e “cautelosos”, respectivamente (Figura 10).



**Figura 10** – Caracterização de comportamento agressivo e cauteloso dos condutores

#### 4.2.4 Plano de simulação para a obtenção das interações veiculares

Foram consideradas quatro variações de demanda veicular (Seção 4.2.1) para três condições ambientais distintas: *i*) sem chuva; *ii*) com chuva e comportamento agressivo; e *iii*) com chuva e comportamento cauteloso. Desta forma, totalizaram-se doze cenários para a simulação microscópica de tráfego no VISSIM 8.0.

Para cada cenário, foram realizadas 30 simulações de 3.600 segundos cada, acrescidas de 600 segundos para o aquecimento da rede. Por fim, para a obtenção das trajetórias veiculares (coordenadas  $x$  e  $y$ , aceleração e velocidade), as quais foram utilizadas para a avaliação das interações veiculares, ativou-se o *direct output* SSAM do VISSIM 8.0.

### 4.3 Caracterização da aderência pneu-pavimento para diferentes condições

A definição do método é uma importante etapa para definir quais ensaios deverão ser executados em campo, no intuito de caracterizar a condição superficial do pavimento. Partindo do método do *International Friction Index* (IFI), necessita-se da caracterização tanto da microtextura quanto da macrotextura do pavimento, a fim de se relatar ambas as características em um índice representativo do atrito superficial. Conforme o objetivo de pesquisa, de caracterizar um corredor tipicamente urbano de Fortaleza/CE, selecionou-se uma via arterial a qual se avaliou a condição superficial *in loco*.

#### 4.3.1 Caracterização do trecho de estudo

Selecionou-se um trecho de via arterial urbana, a qual apresenta características geométricas típicas da realidade de Fortaleza/CE. O trecho estudado possui cerca de 1,5 km referente à Av. Virgílio Távora, compreendido entre as avenidas Antônio Sales e Dom Luís.

Ferreira e Castelo Branco (2016) propuseram a aplicação do *Street View* do *software Google Earth* como auxiliar no levantamento de defeitos de pavimentos. Neste trabalho, aplicou-se o método proposto, a fim de avaliar o estado superficial do trecho escolhido, entendendo que grandes concentrações de defeitos como panelas e/ou trincas em bloco poderiam inviabilizar as análises da condição superficial em campo. A frequência das seis patologias é ponderada pela extensão do trecho avaliado e classificada, qualitativamente, em baixa ( $< 2,0$  defeitos/km), média ( $\geq 2,0$  e  $< 5,0$  defeitos/km) e alta ( $\geq 5,0$  defeitos/km).

Devido à limitação da definição da imagem do *Street View*, o trecho selecionado de estudo foi avaliado quanto à condição superficial de pavimento, de forma qualitativa. Através de filmagens percorrendo o trecho da Avenida Virgílio Távora em ambos os sentidos, os segmentos da via foram classificados, por faixa, em normal, desgastado e recapeado. A partir destes resultados, possibilitou-se o planejamento dos pontos a serem ensaiados em campo, conforme detalhado nas seções subsequentes. A Figura 11 representa as três condições superficiais do pavimento observadas em campo que foram consideradas.



**Figura 11** – Estados de conservação do pavimento considerados e detalhe do desgaste observado em campo

#### 4.3.2 Variação da trilha-de-roda e do estado de conservação

Na caracterização da aderência pneu-pavimento, entende-se que algumas variáveis podem ser relevantes para a interpretação dos resultados obtidos dos ensaios de campo. Desta forma, nesta pesquisa, buscou-se quantificar a diferença entre: *i*) estado de conservação do pavimento; e *ii*) trilha de roda. Consideraram-se três estados de conservação: *i*) recapeamento asfáltico; *ii*) trecho de desgaste; e *iii*) pavimento normal, sem recape e sem desgaste. No intuito de avaliar as condições extremas, os trechos tidos como normais não foram ensaiados.

Quanto às trilhas de roda, para cada estado de conservação, foram avaliadas as rodeiras externas e internas (Figura 12). A fim de obter significância estatística (Teorema do Limite Central), para cada uma das quatro combinações, foram ensaiados 30 pontos. A Tabela 7 resume os pontos ensaiados para cada condição.



**Figura 12** – Demarcação das trilhas de roda em campo

**Tabela 7** – Quadro resumo de pontos ensaiados por características avaliadas

<b>Estado de Conservação</b>	<b>Trilha de Roda</b>	<b>Pontos Ensaiaados</b>
Recapeamento Asfáltico	Externa	30
	Interna	30
Trecho Desgastado	Externa	30
	Interna	30

Os ensaios foram executados com o apoio de agentes e de viatura da Autarquia Municipal de Trânsito e Cidadania (AMC) de Fortaleza/CE, que auxiliou na canalização do fluxo veicular para resguardo da equipe na execução dos testes. Todos os pontos foram ensaiados durante a madrugada, no intuito de isolar os efeitos da temperatura e contribuir com a segurança durante a execução dos ensaios devido ao baixo volume veicular.

O Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos (DNIT, 2006) aponta que os ensaios de avaliação das condições de aderência pneu-pavimento devem ser executados em intervalos de, pelo menos, 20 m, o que foi seguido com algumas poucas ressalvas. Trechos de cruzamentos semaforizados foram desconsiderados por questões de segurança, devido à exposição ao tráfego em dois sentidos distintos, gerando intervalos maiores de 20 m entre os ensaios. Desta forma, os ensaios foram executados em espaços de 5 a 55 m.

#### **4.3.3 Variação da condição ambiental**

Apesar de defasados na literatura, foram adotados os métodos da mancha de areia (ASTM E965, 2015) para a caracterização da macrotextura e do método com o pêndulo britânico (ASTM E303-93, 2013) para a microtextura. Muito embora sejam reconhecidas as limitações destes ensaios empíricos, tratam-se de procedimentos de fácil execução, além de serem adotados nas especificações vigentes no Brasil.

Na presença de água, apenas a microtextura se compromete, uma vez que a película d'água cobre a rugosidade superficial dos agregados que compõem a mistura asfáltica. Assim, não se avaliou a macrotextura para a condição molhada, dado que finas películas não limitam a aderência pneu-pavimento. A presença de água apenas compromete a microtextura quando de espessura mais significativa, culminando no efeito em que os pneumáticos perdem contato com a superfície, conhecido como hidroplanagem (Henry, 2000).

Assim, para caracterizar a microtextura na condição seca, empregou-se o método proposto por Ali *et al.* (1999), executando o ensaio com o pêndulo britânico em superfície seca. Após a execução dos ensaios nos 120 pontos, os 360 resultados foram classificados em: *i*) macrotextura (HS, mm); *ii*) microtextura seca (BPN<sub>S</sub>); e *iii*) microtextura molhada (BPN<sub>M</sub>).

#### 4.4 Análise dos dados de condição superficial

A partir da base de dados, conforme Seção 4.3, realizou-se análise estatística descritiva das três variáveis, no intuito de detectar as variações dos resultados entre as quatro classes avaliadas (Tabela 7). Além de HS, BPN<sub>S</sub> e BPN<sub>M</sub>, executou-se análise análoga para a variação da microtextura em relação à presença ou não de água ( $\Delta$ BPN). Histogramas de frequência foram plotados para avaliar as variações entre as classes estudadas e, também, para verificar os efeitos da presença da água na microtextura. Em seguida, realizou-se a análise de variância (ANOVA) de fator único, com grau de confiança de 95%, para avaliar se existe diferença entre as trilhas de roda externa e interna e, também, entre os estados de conservação do pavimento avaliado. Também foi conduzida análise qualitativa dos resultados, seguindo as faixas de classificação de macrotextura, propostas pela Aps (2006), e de microtextura, propostas pelo DNIT (2006) (Tabela 8). Em extensão, avaliou-se a frequência de observações acima dos limites de segurança de 0,60 mm (Aps, 2006) e de BPN 55 (DNIT, 2006).

**Tabela 8** – Classificação da (a) macrotextura (Aps, 2006) e da (b) microtextura (DNIT, 2006)

<b>Classificação</b>	<b>HS (mm)</b>	<b>Classificação</b>	<b>BPN</b>
Muito Fina	$\leq 0,20$	Perigosa	$< 25$
Fina	$> 0,20 \leq 0,40$	Muito Lisa	$\geq 25 < 32$
Medianamente Fina	$> 0,40 \leq 0,60$	Lisa	$\geq 32 < 40$
Média	$> 0,60 \leq 0,80$	Insuficientemente Rugosa	$\geq 40 < 47$
Medianamente Grossa	$> 0,80 \leq 1,00$	Medianamente Rugosa	$\geq 47 < 55$
Grossa	$> 1,00 \leq 1,20$	Rugosa	$\geq 55 \leq 75$
Muito Grossa	$> 1,20$	Muito Rugosa	$> 75$

(a)

(b)

Método do IFI foi aplicado conforme a ASTM E1960 (2015) para os resultados obtidos para pavimento seco e molhado, classificados conforme Tabela 2 (Capítulo 2). Chowdhury *et al.* (2017) obtiveram correlação linear do atrito obtido pelo IFI *versus* ensaios contínuos de misturas asfálticas ( $r^2$  de 0,94 para tratamentos superficiais; e 0,61 para CA convencional), apontando para a adequabilidade deste modelo na determinação do atrito superficial de misturas asfálticas.

Costa *et al.* (2017) aplicaram o método do IFI para a determinação de curvas de atrito para as velocidades de 10 a 60 km/h de diferentes técnicas de pavimentação, cujos dados de condição superficial foram obtidos de publicações nacionais. Foram reportados resultados considerando a condição de pavimento molhado, situação de maior risco. Seguindo a proposta metodológica destes autores, foram traçadas curvas de atrito superficial *versus* velocidade para

as condições distintas avaliadas, no intuito de identificar similaridade do desempenho das condições superficiais avaliadas nesta pesquisa com as onze técnicas distintas avaliadas pelos autores. Além disso, curvas das condições avaliadas nesta pesquisa foram comparadas com as curvas de quatro das onze técnicas avaliadas, após avaliação visual da condição de campo, sendo elas: *i*) CA; *ii*) CA com adição de Borracha na mistura asfáltica (CA-B); *iii*) Tratamento Superficial Simples (TSS); e *iv*) Tratamento Superficial Duplo (TSD).

Um dos pontos de partida desta pesquisa é o entendimento de que a condição superficial de atrito não pode ser considerada como constante, devido aos diversos fatores que podem influenciá-la. Além das análises qualitativas e quantitativas, esta seção tem como objetivo determinar se os parâmetros de micro e de macrotextura podem ser gerados aleatoriamente, segundo uma distribuição estatística conhecida. Testes de aderência Qui-Quadrado com grau de confiança de 95% foram conduzidos nas amostras de parâmetros superficiais, a fim de verificar a adequação de modelos probabilísticos a estes dados. Para a hipótese ser aceita, a estatística de teste ( $\chi_{obs}^2$ ) deve ser menor que o valor crítico ( $\chi_{crítico}^2$ ).

O resultado desta seção fornece um importante dado para a análise do DSV considerando a condição superficial do pavimento: coeficiente de atrito ( $\mu$ ). Conforme o modelo do IFI, macro e microtextura podem ser convertidas em atrito superficial para variadas faixas de velocidade, que será utilizada *a posteriori* no modelo de frenagem máxima disponível.

#### **4.5 Estimação da frequência e da severidade dos conflitos veiculares**

Nesta seção, são avaliadas a frequência e a severidade dos conflitos microssimulados. O *Surrogate Safety Assessment Model* (SSAM) utiliza os dados das interações veiculares obtidas da simulação, registrando situações de conflito para valores default de 1,5 s para TTC e de 5,0 s para PET (Gettman e Head, 2003; Pu e Joshi; 2008). A Seção 4.5.1 apresenta a análise da frequência, classificando os conflitos em longitudinais, laterais e transversais. As Seções 4.5.2 e 4.5.3 analisam a severidade dos conflitos veiculares pelos indicadores *proxy* DRAC e MADR. As seções que compõem esta etapa metodológica são replicadas para cada um dos cenários propostos.

##### **4.5.1 Análise da frequência dos conflitos veiculares por tipo**

O SSAM categoriza os conflitos veiculares a depender do ângulo de interação dos veículos em três classes: *i*) conflitos longitudinais (ou *rear end*), com interações frente-traseira;



ii) conflitos transversais, em situações em que os veículos conflitantes se encontram praticamente perpendiculares (cruzamento ou *crossing*); e iii) conflitos laterais, situações intermediárias, geralmente vivenciadas em mudanças de faixa. Para cada cenário, foram avaliadas as ocorrências dos três tipos de conflito, no intuito de identificar algum padrão de comportamento. Médias, desvios padrão, 15° e 85° percentis foram comparados na análise. Além disso, mapas de calor dos conflitos longitudinais foram gerados, no intuito de analisar se as ocorrências predominam em meios de quadra ou em interseções, semaforizadas ou não.

#### 4.5.2 Análise da severidade dos conflitos veiculares pelo indicador proxy DRAC

Indicadores temporais de conflitos veiculares são tidos como limitados na caracterização da severidade dos conflitos veiculares, devido à exclusão dos efeitos da energia cinética (Cunto, 2008). Neste contexto, o indicador *proxy deceleration rate to avoid the crash* (DRAC) foi utilizado nesta pesquisa para caracterizar a intensidade dos conflitos veiculares, quantificado pela Equação 13 (Seção 3.1). Análise estatística descritiva foi conduzida para cada cenário avaliado, sendo comparadas médias, desvios padrão e percentis (15° e 85°). Também, foram avaliadas as distribuições de frequência para cada cenário e a classificação qualitativa do DRAC proposta por Hydén (1996).

**Tabela 9** – Classificação qualitativa do indicador DRAC (Hydén, 1996)

Severidade	Descrição	DRAC ( $m/s^2$ )	
Sem Conflito	Nenhuma Alteração	0,00	
Sem Conflito	Medida Adaptativa	> 0,00	< 1,00
1	Reação Normal	$\geq 1,00$	< 2,00
2	Reação Significativa	$\geq 2,00$	< 4,00
3	Reação Brusca	$\geq 4,00$	< 6,00
4	Reação Emergencial	$\geq 6,00$	

#### 4.5.3 Análise da severidade dos conflitos veiculares pelo indicador proxy MADR

Além da frenagem necessária, cada interação de tráfego distinta apresenta uma frenagem máxima disponível (*maximum available deceleration rate*, MADR), a depender de fatores relacionados ao ambiente, ao veículo e ao pavimento. Como exemplo, vias molhadas, típico cenário de atrito superficial reduzido, podem apresentar maiores riscos para frenagens bruscas. Nesta seção, descreve-se o método adotado para a incorporação da condição superficial,

obtida pelo método do IFI a partir dos indicadores de micro e de macrot textura, no indicador *proxy* de SV que considera a frenagem veicular. Esta análise faz-se necessária pois a severidade vai depender não somente da frenagem veicular, mas também do atrito superficial, o que não é considerado pelo indicador temporal TTC.

Diversos fatores influenciam no desempenho da frenagem máxima disponível, variando, inclusive, entre veículos de quatro e de duas rodas. Canale (1989) propõe o modelo de frenagem dinâmica em linha reta para automóveis de peso  $W$  ( $N$ ), levando em consideração os efeitos da aderência superficial ( $\mu$ ), a resistência ao rolamento dos pneumáticos ( $f$ ), a resistência aerodinâmica ( $R_a$ ,  $N$ ) e os efeitos gravitacionais ( $g$ ,  $9,81 \text{ m/s}^2$ ), além da inclinação da superfície ( $\theta$ ) e do fator de influência das partes rotativas do veículo ( $\gamma_b$ ) (Equação 20), adotada nesta pesquisa.

$$MADR_{4R} = \frac{g}{\gamma_b} \cdot \left( \mu + f - \text{sen}\theta + \frac{R_a}{W} \right) \quad (20)$$

Canale (1989) aponta que  $f$  é influenciado por sete variáveis (solo, pressão interna e raio dos pneus, velocidade, força de tração do motor, carga radial e temperatura ambiente). Considerando a pressão constante ( $30 \text{ psi}$ ), a determinação de  $f$  é simplificada em função da velocidade ( $v$ ,  $\text{km/h}$ ) veicular (Equação 21).

$$f = 0,01 + 0,0162 \cdot \left( \frac{v}{160} \right)^{2,5} \quad (21)$$

Resistência aerodinâmica de trata da resistência do ar a um corpo em movimento. A Equação 22 determina  $R_a$ , diretamente proporcional ao coeficiente de arrasto ( $C_a$ ), à densidade do ar ( $\rho$ ), à área frontal veicular ( $A$ ,  $\text{m}^2$ ) e à velocidade veicular ( $v$ ,  $\text{m/s}$ ). A densidade do ar para a temperatura de  $30^\circ\text{C}$ , típica em Fortaleza, de  $1,1644 \text{ kg/m}^3$ , é considerada constante.

$$R_a = \frac{C_a \cdot \rho \cdot A \cdot v^2}{2 \cdot g} \quad (22)$$

A Tabela 10 apresenta as constantes e as variáveis por tipo de veicular considerados, obtidos de guias automobilísticos e de Canale (1989). Estes valores foram atribuídos aleatoriamente a depender do tipo veicular envolvido em cada conflito registrado, respeitando os limites inferior e superior propostos.

**Tabela 10** – Quadro-resumo das variáveis constantes e dependentes do tipo veicular

<b>Descrição</b>	<b>Variável</b>	<b>Valor</b>
Aceleração da Gravidade	$g$	9,81 $m/s^2$
Fator de Influência das Partes Rotativas do Veículo	$\gamma_b$	1,04
Grau de Inclinação da Via	$\theta$	0°
Densidade do Ar a 30°C	$\rho$	1,1644 $kg/m^3$
Massa Veicular (Automóvel)		1000 - 2000 $kg$
Massa Veicular (Ônibus)	$m$	8000 - 16000 $kg$
Massa Veicular (Caminhão)		16000 - 33000 $kg$
Coeficiente de Arrasto (Automóvel)		0,25 - 0,45
Coeficiente de Arrasto (Ônibus)	$C_a$	0,60 - 0,70
Coeficiente de Arrasto (Caminhão)		0,80 - 1,00
Área Frontal (Automóvel)		1,30 - 2,80 $m^2$
Área Frontal (Ônibus)	$A$	5,90 - 8,10 $m^2$
Área Frontal (Caminhão)		4,20 - 6,20 $m^2$

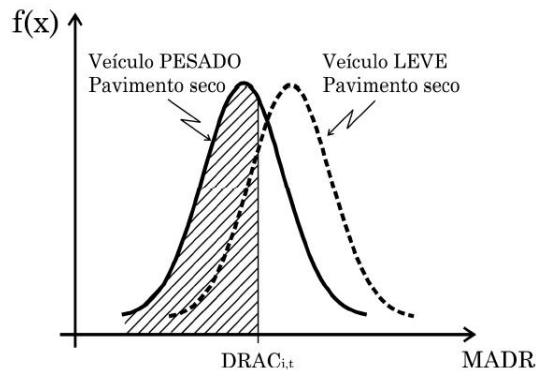
#### 4.5.3.1 MADR como um indicador proxy

Para os conflitos veiculares registrados pelo VISSIM e filtrados pelo SSAM, definiu-se a taxa de desaceleração máxima disponível, em função da dinâmica e da característica veicular e da condição de atrito superficial. Avaliou-se o comportamento médio e de dispersão para ambos os tipos veiculares em cenário avaliado; além disso, distribuição de frequência acumulada de MADR foi avaliada, no intuito de detectar padrões de comportamento.

## 4.6 Análise do desempenho da segurança viária em variadas condições ambientais

Última etapa metodológica, esta seção descreve o procedimento de avaliação do desempenho da SV através dos dois indicadores *proxy* DRAC e MADR. Para cada interação veicular obtida do SSAM, existe uma taxa de DRAC (necessária) e de MADR (máxima disponível). Cunto (2008) abordou esta relação, apontando o comportamento variável da taxa de frenagem máxima (MADR) segundo uma distribuição de probabilidade normal e o comportamento determinístico da taxa de frenagem necessária (DRAC). A variação do MADR é entendida devido aos aspectos relacionados ao motorista e até aos veículos. Já o DRAC é interpretado como constante por levar em consideração apenas a trajetória e a velocidade dos veículos no instante crítico do conflito e independe da condição do pavimento (Figura 13). Já a curva de MADR varia segundo estas mesmas condições; a probabilidade de um mesmo

condutor atingir o DRAC conduzindo um caminhão em um dia de sol (pavimento seco) é entendida como menor do que a probabilidade do mesmo condutor em um automóvel particular esportivo.



**Figura 13** – Função densidade da probabilidade do indicador MADR (Cunto, 2008)

As interações veiculares  $DRAC \leq MADR$  foram interpretadas como situações em que o condutor conflitante conseguiu desenvolver a desaceleração necessária, descartando a necessidade de manobras evasivas (mudança de faixa, por exemplo). Consideradas, então, como interações veiculares, a razão de DRAC por MADR representa a intensidade do evento – quanto mais próximo de 1,0, maior a severidade da interação.

As situações  $DRAC > MADR$  foram consideradas como conflitos veiculares, forçando os condutores à mudança de direção para evitar a colisão. Este entendimento é devido à não disponibilidade de frenagem suficiente para que o condutor conflitante permaneça no mesmo sentido e na mesma faixa. Assim, seguindo as definições de interação veicular e de conflito veicular a partir dos indicadores *proxy* DRAC e MADR, foram avaliados os diferentes cenários propostos, tanto com relação ao volume veicular quanto à condição ambiental.

## 5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

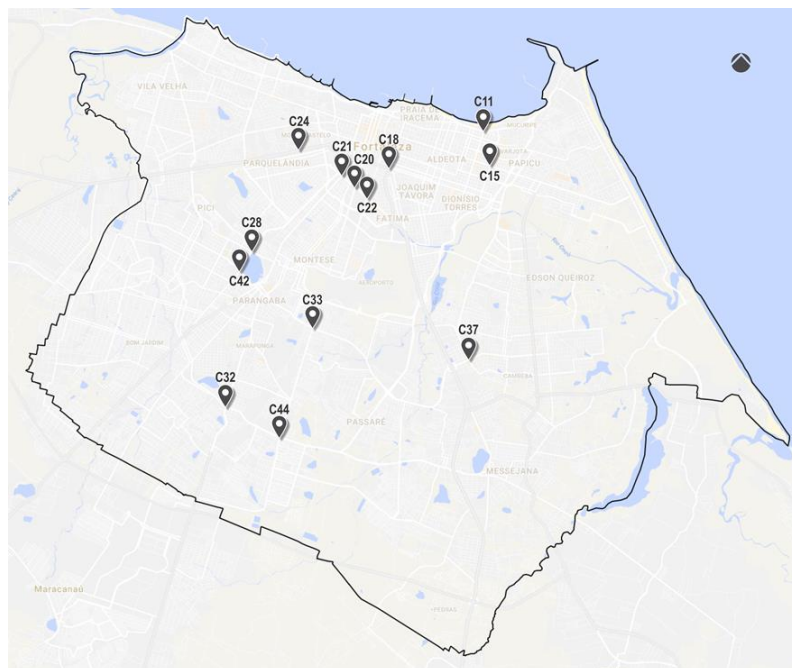
Neste capítulo, são apresentados os resultados finais obtidos desta pesquisa de Mestrado. Para melhor compreensão e organização do método já executado, os resultados foram expostos seguindo as etapas metodológicas, abordadas no Capítulo 4.

### 5.1 Comportamento do condutor em condições ambientais adversas

Conforme a Seção 4.1 define, esta seção apresenta os resultados obtidos da caracterização do comportamento do condutor com a variação da condição ambiental. Primeiramente, são apresentados os resultados de *headway* ( $h_s$ ) e de fluxo de saturação (FS) (Seção 5.1.1); em seguida, os resultados de velocidade de fluxo livre são discutidos.

#### 5.1.1 Headway e fluxo de saturação

Foram selecionados 13 equipamentos de videomonitoramento, localizados em diferentes interseções semaforizadas de Fortaleza. Compuseram a amostra dois períodos do pico manhã de dia útil (7h30 às 8h00) para dias de chuva e dois para dias sem chuva. A Figura 14 apresenta a localização das interseções avaliadas, demonstrando que os locais cobrem boa abrangência de Fortaleza.



**Figura 14** – Localização das câmeras de videomonitoramento do CTAFOR utilizadas

Foi possível determinar 25 FS de faixas distintas com as 13 câmeras, os quais foram classificados por movimentos possíveis. Os movimentos de conversão, foram agrupados em: *i*) movimento reto (R); *ii*) movimento reto com conversão à direita (D); *iii*) movimento reto com conversão à esquerda (E); e *iv*) conversão exclusiva à esquerda (CE). A Tabela 11 abaixo apresenta os equipamentos de videomonitoramento utilizados, suas respectivas interseções e os FS obtidos a depender dos movimentos permitidos de cada faixa. As Figuras 15 a 20 apresentam focos avaliados para a determinação dos 25 *headways* de saturação ( $h_s$ ).

**Tabela 11** – Câmeras de videomonitoramento e movimentos avaliados

Câmera	Interseções		Movimento			
			↑	↗	↖	↙
C11	Des. Moreira	Abolição	X		X	
C15	Virgílio Távora	Santos Dumont		X	X	
C18	Aguanambi	Dom. Olímpio	X		X	
C20	Sen. Pompeu	13 de Maio		X	X	
C21	Universidade	13 de Maio		X	X	X
C22	Luciano Carneiro	13 de Maio	X	X		X
C24	Pe. Anchieta	Bezerra de Menezes			X	
C28	José Bastos	Carneiro de Mendonça	X		X	
C32	Godofredo Maciel	Costa e Silva	X	X	X	
C33	Bernardo Manoel	Silas Munguba			X	
C37	Des. Gonzaga	Oliveira Paiva	X		X	
C42	José Bastos	Gomes Brasil			X	
C44	Bernardo Manoel	Costa e Silva	X			



**Figura 15** – Focos (a) C11 Des. Moreira x Abolição e (b) C15 Virgílio Távora x Santos Dumont





**Figura 16** – Focos (a) C18 Aguanambi x Dom. Olímpio e (b) C20 Sen. Pompeu x 13 de Maio

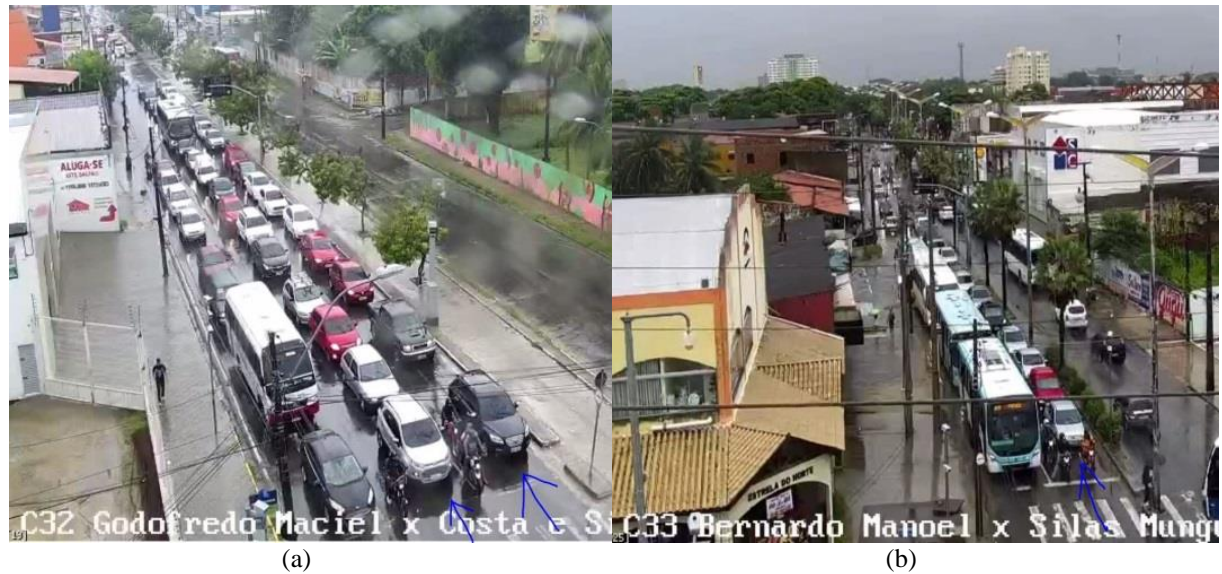


**Figura 17** – Focos (a) C24 Universidade x 13 de Maio e (b) C22 Luciano Carneiro x 13 de Maio



**Figura 18** – Focos (a) C24 Pe. Anchieta x Bezerra de Menezes e (b) C28 José Bastos x Carneiro Mendonça





**Figura 19** – Focos (a) C32 Godofredo Maciel x Costa e Silva e (b) C33 Bernardo Manoel x Silas Munguba



**Figura 20** – Focos (a) C37 Des. Gonzaga x Oliveira Paiva e (b) C42 José Bastos x Gomes Brasil

A Tabela 12 apresenta os resultados da comparação de  $h_s$  das condições de chuva e de sol e o resultado do teste- $t$  das faixas avaliadas. Dos resultados, predominou o comportamento cauteloso na presença de chuva (56% das situações), porém 12% das observações apontaram para  $\Delta$  negativo ( $h_s$  menor na chuva). Ressalta-se que estas observações apresentaram significativa dispersão, de 11 a 20% na chuva e de 11 a 19% na condição seca.

Destacaram-se os resultados em que não se pôde rejeitar  $H_0$  de igualdade das médias dos  $h_s$ . Em 11 situações (44%), o valor- $p$  foi superior a  $\alpha$  5%. Uma hipótese plausível levantada é que o desejo de mudar de faixa para acessar lotes ou vias transversais pode influenciar na homogeneização comportamental, resultando em velocidades menores e, conseqüentemente, *headways* insensíveis à variação ambiental – as duas únicas observações exclusivas do



movimento CE tiveram  $H_0$  de igualdade das médias não rejeitadas. Nesta análise, considerou-se que as amostras são independentes.

**Tabela 12** – Headway de saturação ( $h_s$ ) das faixas avaliadas

Movimento	Interseção	$h_s$ Chuva			$h_s$ Seco			$\Delta$ (%)	Teste de Hipótese	
		$n$	$\bar{x}$ (s)	$S_d$ (s)	$n$	$\bar{x}$ (s)	$S_d$ (s)		$P(T \leq t)$	$H_0$
↑	C11	26	2,30	0,35	45	2,09	0,25	9%	0,013	Rejeita
	C18	23	2,53	0,41	34	2,34	0,28	7%	0,074	<b>Não Rejeita</b>
	C22	24	2,28	0,23	43	2,06	0,27	10%	0,001	Rejeita
	C28	25	2,26	0,30	20	2,36	0,37	<b>-5%</b>	0,322	<b>Não Rejeita</b>
	C32	22	2,44	0,43	40	2,31	0,31	5%	0,224	<b>Não Rejeita</b>
	C37	48	2,14	0,26	51	1,96	0,20	8%	0,0002	Rejeita
	C44	9	2,50	0,28	16	2,25	0,33	10%	0,055	<b>Não Rejeita</b>
↗	C15	20	2,55	0,37	25	2,32	0,31	9%	0,029	Rejeita
	C20	13	2,46	0,27	20	2,21	0,29	10%	0,019	Rejeita
	C21	30	2,31	0,24	44	2,28	0,20	1%	0,620	<b>Não Rejeita</b>
	C22	20	2,41	0,28	43	2,14	0,31	11%	0,001	Rejeita
	C32	14	2,58	0,19	8	2,53	0,31	2%	0,739	<b>Não Rejeita</b>
↖	C11	24	2,17	0,36	25	2,15	0,43	1%	0,857	<b>Não Rejeita</b>
	C15	18	2,40	0,28	23	2,34	0,23	3%	0,415	<b>Não Rejeita</b>
	C18	22	2,47	0,28	34	2,51	0,28	<b>-2%</b>	0,617	<b>Não Rejeita</b>
	C20	15	2,57	0,24	34	2,24	0,34	13%	0,000	Rejeita
	C21	27	2,37	0,24	45	2,20	0,29	7%	0,013	Rejeita
	C24	34	2,38	0,37	43	2,17	0,31	9%	0,010	Rejeita
	C28	35	2,41	0,28	13	2,19	0,21	9%	0,007	Rejeita
	C32	25	2,20	0,20	49	2,02	0,21	8%	0,001	Rejeita
	C33	22	2,24	0,22	58	2,07	0,21	8%	0,003	Rejeita
	C37	44	2,34	0,35	56	2,16	0,27	7%	0,008	Rejeita
	C42	27	2,33	0,23	38	2,10	0,23	10%	0,000	Rejeita
↘	C21	25	2,56	0,31	23	2,43	0,21	5%	0,109	<b>Não Rejeita</b>
	C22	20	2,24	0,42	26	2,26	0,44	<b>-1%</b>	0,873	<b>Não Rejeita</b>

Pela Tabela 12, percebeu-se variação do  $h_s$  médio na ordem dos centésimos de segundos. Desta forma, todas as observações foram agrupadas em amostras por movimento (Tabela 13). A redução média observada no  $h_s$  foi de 8% com  $s_d$  de 4%, além de 2% e 11% de 15° e 85° percentil, respectivamente. A redução de  $h_s$  variou de 3 a 8%, não observada variação negativa. Apenas para o movimento CE não se rejeitou a hipótese nula, que corroborou com a hipótese do efeito do movimento de conversão, que torna o comportamento do condutor mais homogêneo, constatado pela menor variação média dentre as situações avaliadas (3%), além da maior dispersão das observações (16% chuva, 15% sem chuva).

Tabela 13 – Headway de saturação ( $h_s$ ) agrupado por movimento

Movimento	$h_s$ Chuva			$h_s$ Seco			$\Delta$ (%)	Teste de Hipótese	
	$n$	$\bar{x}$ (s)	$S_d$ (s)	$n$	$\bar{x}$ (s)	$S_d$ (s)		$P(T \leq t)$	$H_0$
↑	177	2,30	0,35	249	2,16	0,31	6%	0,0000	Rejeita
↗	97	2,44	0,29	140	2,25	0,29	8%	0,0000	Rejeita
↖	293	2,35	0,30	418	2,18	0,30	7%	0,0000	Rejeita
↘	45	2,42	0,38	49	2,34	0,36	3%	0,3435	<b>Não Rejeita</b>

### 5.1.2 Velocidade de fluxo livre

A partir dos critérios da Seção 4.2.2, foram selecionados 3 pares de fotossensores para avaliar VFL. A Figura 21 apresenta o *campus* da UECE e os pontos selecionados no raio de 5,0 km à PCD da Funceme, o que, segundo a fundação, configura boa representatividade da incidência de chuva. Os pares 069-120 e 063-116 estão localizados na Av. Alberto Craveiro e distam 632 e de 610 m, respectivamente (Figura 22(a)). O par 021-084, na Av. Paulino Rocha, dista 588 m (Figura 22(b)). Analisando os registros dos fotossensores de janeiro/2014 a março/2017, selecionou-se o período de 23h às 4h, por apresentar fluxo veicular < 300 *veic/h/fx*. Agruparam-se os registros pela intensidade de precipitação propostas por Billot *et al.* (2009). A Tabela 14 apresenta os resultados da análise estatística das três classes de intensidade.

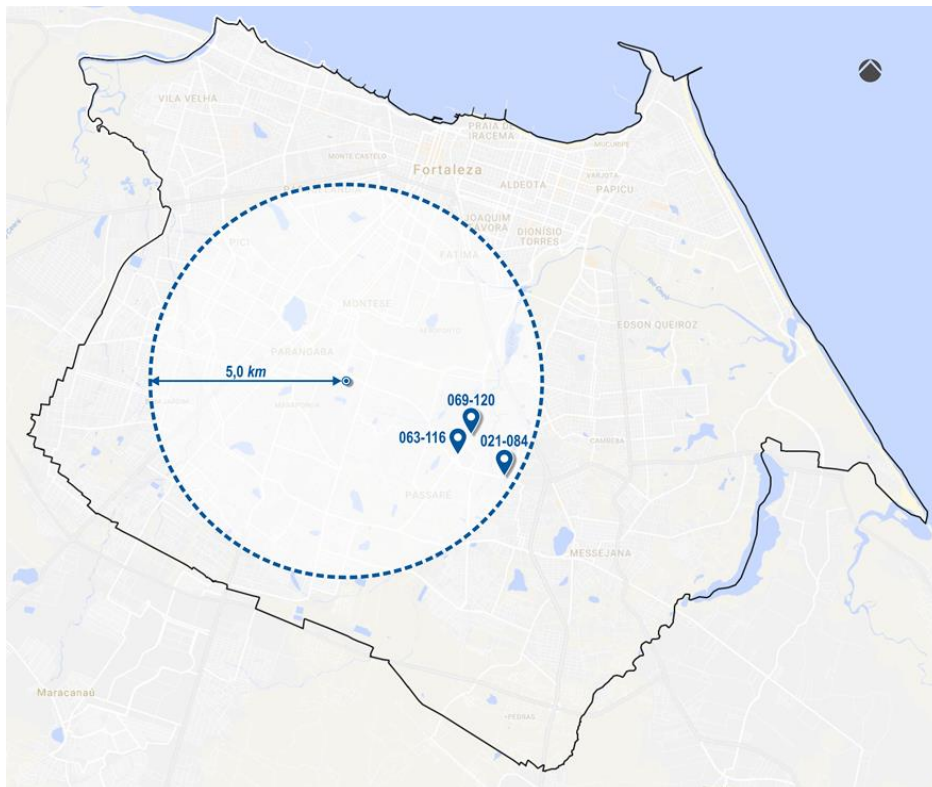
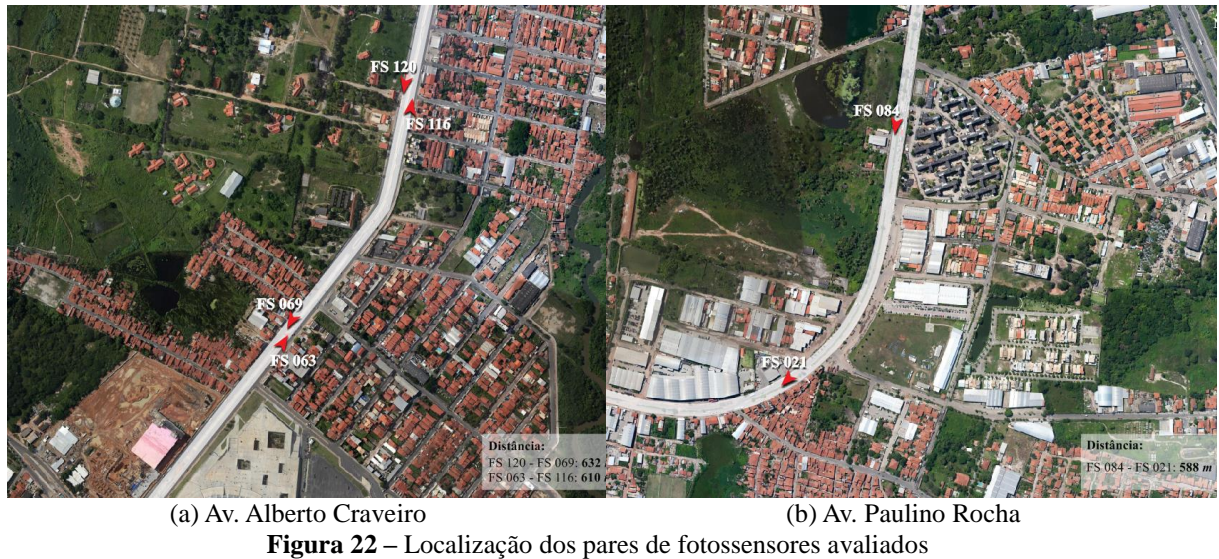


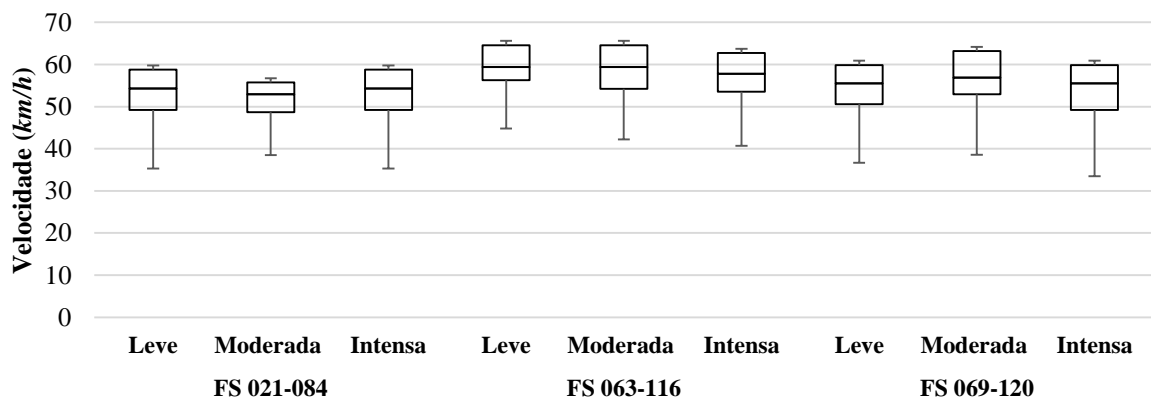
Figura 21 – Mapa da localização dos equipamentos de fiscalização eletrônica utilizados



Esperava-se a redução média e o aumento da dispersão de VFL com a intensidade da chuva, considerando que comportamentos agressivos fossem evidenciados em desvios padrão maiores. Os resultados obtidos, contudo, não foram conclusivos acerca da existência de padrão de comportamento da VFL em relação à intensidade da chuva: apenas o par FS 063-116 apresentou redução de 2% da VFL da chuva intensa para leve (Figura 23).

**Tabela 14** – Resultados de VFL para os níveis de intensidade de precipitação

	FS 021-084			FS 063-116			FS 069-116		
	Leve	Moderada	Intensa	Leve	Moderada	Intensa	Leve	Moderada	Intensa
<i>n</i>	1215	819	1532	328	323	358	172	102	228
$\bar{x}$	54,04	52,97	54,00	59,51	59,13	58,49	54,89	56,32	53,89
<i>S<sub>d</sub></i>	7,53	6,98	7,93	6,91	7,27	7,65	12,22	8,98	10,30
<b>CV</b>	14%	13%	15%	12%	12%	13%	22%	16%	19%
<i>P<sub>15</sub></i>	47,04	46,02	47,04	52,29	52,29	51,07	45,50	48,88	40,89
<i>P<sub>85</sub></i>	60,48	60,48	62,26	66,55	66,55	64,59	63,20	65,01	63,20



**Figura 23** – Boxplot dos resultados de VFL por intensidade de precipitação

Não sendo possível identificar padrões conforme a precipitação se intensificou, partiu-se para a análise de duas situações apenas – com e sem chuva. A Tabela 15 compila os resultados da análise estatística descritiva e da variação percentual chuva *versus* seco para cada um dos pares avaliados. Além disso, também são apresentados os resultados do teste-*t* de hipótese com hipótese nula de igualdade das médias para 5% de nível de significância.

**Tabela 15** – Resultados de VFL para a condição seca *versus* chuva

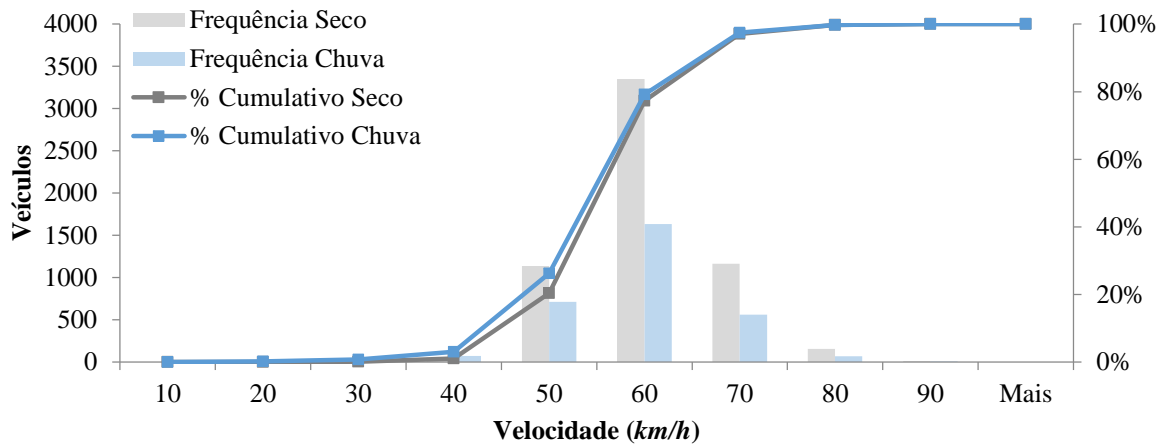
	FS 021-084		FS 063-116		FS 069-120	
	Seco	Chuva	Seco	Chuva	Seco	Chuva
<i>n</i>	5890	3087	1040	1009	727	502
$\bar{x}$ (km/h)	55,1	54,0	61,3	59,0	54,8	54,7
<i>S<sub>d</sub></i> (km/h)	6,9	7,7	8,4	7,3	7,5	10,8
$\Delta$ (%)		1,95%		3,77%		0,18%
CV (%)	13%	14%	14%	12%	14%	20%
<i>P</i> <sub>15</sub> (km/h)	50,4	49,2	56,3	54,9	50,6	50,6
<i>P</i> <sub>85</sub> (km/h)	62,3	62,3	68,6	66,5	61,5	63,2
P(T ≤ t)		0,000		0,000		0,851
<i>H</i> <sub>0</sub>		Rejeita		Rejeita		<b>Não Rejeita</b>

Analisando os resultados, observou-se redução da VFL média para a condição chuvosa em relação à condição seca, variando de 0,18 a 3,77%, corroborando com a premissa esperada de maior cautela dos condutores. Quanto ao desvio padrão, com exceção do par FS 063-116, os demais apresentaram maior dispersão das VFL em chuva. Entretanto, dois fatores colocaram em cheque, estatístico e tecnicamente, a premissa de que a incidência de chuvas interfere na VFL. Primeiramente, não se obteve unanimidade na rejeição da hipótese nula de igualdade das médias; o valor-*p* do par FS 069-120, inclusive, não foi significativo.

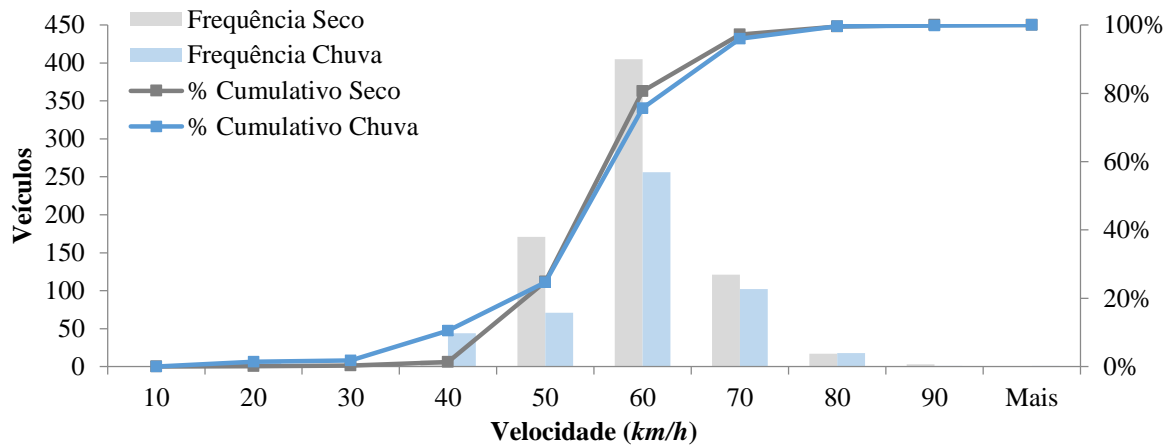
Por fim, para os dois casos em que se rejeitou a hipótese nula, a variação percentual foi muito baixa, representando reduções unitárias da VFL em dias chuvosos. Para a maior variação (3,77%), observou-se uma redução de 2 km/h, o que pode ser considerado como de baixa significância, em termos técnicos – e até mesmo de segurança viária.

Nem pelo comportamento médio nem pela dispersão foram constatados padrões da VFL com a presença de chuva. As curvas de distribuição de frequência acumulada também corroboram com os resultados obtidos e expressos na Tabela 15. A Figura 24 (FS 021-084) apresenta as curvas praticamente sobrepostas. A Figura 25 (FS 069-120) apresenta comportamento similar à anterior, com uma maior concentração (10%) de velocidades na faixa de 30 a 40 km/h para a condição chuvosa. A distribuição acumulada do par FS 063-116 se

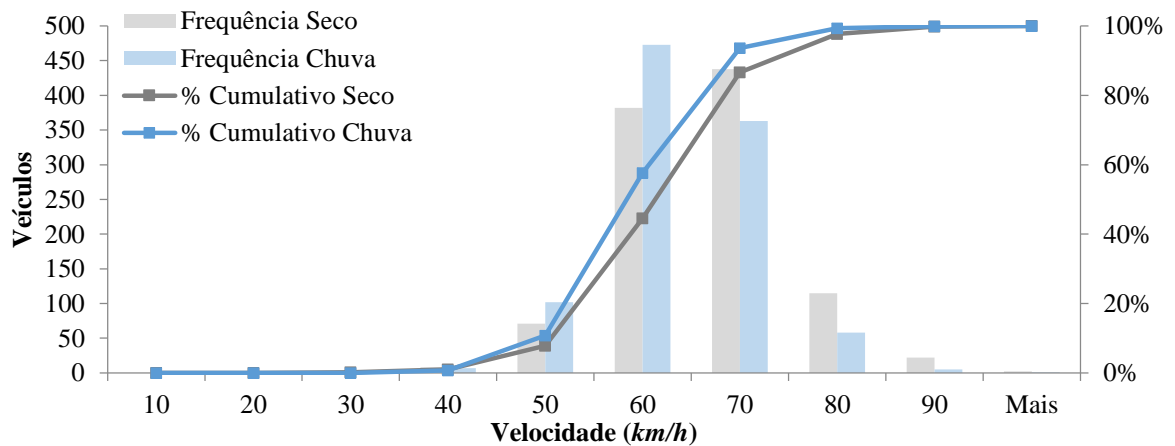
apresentou conforme esperado (Figura 26), com a frequência de velocidades mais baixas predominando na condição chuvosa, mas o *shift* das curvas, assim como os resultados médios e de dispersão, não se mostrou relevante.



**Figura 24** – Frequência acumulada de VFL seco *versus* chuva do par FS 021-084



**Figura 25** – Frequência acumulada de VFL seco *versus* chuva do par FS 069-120



**Figura 26** – Frequência acumulada de VFL seco *versus* chuva do par FS 063-116

## 5.2 Simulação microscópica de tráfego para a extração das interações veiculares

A rede representando uma via arterial típica de Fortaleza foi modelada no VISSIM 8.0. Antes da simulação, tendo definido FS como medida de desempenho, coletaram-se os *headways* veiculares no pico matinal de dois dias úteis típicos. Foram obtidos 44 ciclos semafóricos, com FS médio de 1.595,6 *veic/h*. Pelos resultados da Seção 5.1, desconsiderou-se a variação do comportamento quanto à VFL. Para o FS, entretanto, observou-se variação média de 8%, com 15° e 85° percentis de 2% e 11%. Desta forma, considerou-se que a redução de 2% no FS foi o alvo da calibração dos parâmetros *bx* para representar o comportamento agressivo e que a redução de 11% foi atribuída ao comportamento mais cauteloso.

O primeiro esforço de calibração foi a representação da rede em dias de sol. Este cenário foi simulado com os parâmetros default do VISSIM 8.0, com os parâmetros calibrados por Lacerda (2016). Com erro percentual (EP) de 27%, os valores *default* foram prontamente descartados; para os valores de  $ax = 2,20$  e  $bx = 5,00$ , obteve-se EP de -2%, sendo estes alocados para representar o comportamento agressivo em dias de chuva. O menor EP obtido para representar os dias secos foi de -0,7% com  $bx = 4,70$ . Por fim, a calibração que mais se aproximou da redução de 11% do FS, que pode ser entendido como o EP, obteve  $bx = 6,50$  (EP = 12%). A Tabela 16 resume os parâmetros adotados para cada cenário de simulação.

**Tabela 16** – Resultado da calibração dos parâmetros de *car-following*

Cenário	$ax$ (m)	$bx\_add$	$bx\_mult$	FSCAMPO (veic/h)	FS <sub>SIM</sub> (veic/h)	EP
Default	2,00	2,00	3,00		2029,80	27,0%
Seco	2,20	4,70	4,70		1584,46	-0,7%
Chuva / Agressivo	2,20	5,00	5,00	1595,60	1556,10	-2,0%
Chuva / Cauteloso	2,20	6,50	6,50		1397,49	-12,0%

## 5.3 Caracterização e análise estatística da aderência pneu-pavimento

No método proposto (Capítulo 4), duas etapas metodológicas compõem a avaliação da condição superficial do pavimento seco e molhado (Seções 4.3 e 4.4), apresentados nesta seção. No Apêndice A, encontram-se os resultados dos ensaios realizados em campo. A Seção 5.3.1 apresenta e discute os resultados da análise estatística descritiva para as quatro condições avaliadas e, em seguida, são apresentados os resultados obtidos a partir dos testes ANOVA das quatro variáveis, no intuito de verificar se existe diferença na condição superficial nas TR.

Na Seção 5.3.2, os dados são avaliados conforme o estado de conservação, apresentando resultados de testes estatísticos. A Seção 5.3.3 analisa qualitativamente os dados e, por fim, são apresentados os resultados do *International Friction Index* (IFI) (Seção 5.3.4).

### 5.3.1 Caracterização do trecho de pesquisa

Seguindo Ferreira e Castelo Branco (2016), computaram-se as frequências de seis diferentes tipos de patologias para ambas as faixas (rente à calçada e ao canteiro central) de ambos os sentidos de tráfego dos 1,5 km avaliados da Avenida Virgílio Távora, em Fortaleza/CE (Tabelas 17 e 18). Foram considerados defeitos de “panela”, “remendo” e “trincas”.

As “panelas” são defeitos no pavimento asfáltico caracterizados pela formação de buracos na superfície; as “trincas”, identificadas a olho nu na superfície, são fendas que aparecem tanto longitudinal quanto transversalmente ao eixo da via, que podem evoluir e formar blocos na superfície do pavimento; os “remendos”, por fim, são medidas paliativas com aplicação de massa asfáltica em “panelas” ou da necessidade de criar um poço de visita (PV) de drenagem após a execução do pavimento.

**Tabela 17** – Avaliação dos defeitos de superfície para o sentido norte-sul do trecho de estudo

	Calçada			Canteiro		
	<i>n</i>	Por km	Classificação	<i>n</i>	Por km	Classificação
<b>Panela</b>	2	1,3	Baixa	7	4,7	Média
<b>Remendo</b>	<b>Panela</b>	9	6,0	2	1,3	Baixa
	<b>PV</b>	5	3,3	19	12,7	Alta
	<b>Bloco</b>	-	-	2	1,3	Baixa
<b>Trinca</b>	<b>Longitudinal</b>	4	2,7	6	4,0	Média
	<b>Transversal</b>	-	-	2	1,3	Baixa

**Tabela 18** – Avaliação dos defeitos de superfície para o sentido sul-norte do trecho de estudo

	Calçada			Canteiro		
	<i>n</i>	Por km	Classificação	<i>n</i>	Por km	Classificação
<b>Panela</b>	2	1,3	Baixa	6	4,0	Média
<b>Remendo</b>	<b>Panela</b>	7	4,7	17	11,3	Alta
	<b>PV</b>	5	3,3	12	8,0	Alta
	<b>Bloco</b>	3	2,0	9	6,0	Alta
<b>Trinca</b>	<b>Longitudinal</b>	9	6,0	7	4,7	Média
	<b>Transversal</b>	4	2,7	5	3,3	Média



O defeito de superfície mais preponderante observado no trecho de estudo se concentraram na faixa rente ao canteiro central, sendo o remendo de poços de visita (PV) o mais recorrente no sentido norte-sul e o remendo de panela para sul-norte. Apesar de classificados como de alta frequência, estes defeitos são entendidos como pontuais, não acarretando dificuldades para a avaliação da condição superficial de atrito. Neste trabalho, foram obtidos os parâmetros de condição superficial (micro e macrotextura) para as condições extremas de pavimento: desgastado e recapeado. Selecionou-se a faixa de tráfego do trecho estudado com maior incidência de ambos trechos com desgaste e com recapeamento asfáltico. Desta forma, pelo resultado expresso na Figura 27, *in loco*, ensaiou-se a faixa rente ao canteiro central do sentido sul-norte (Antônio Sales-Dom Luís).



**Figura 27** – Avaliação qualitativa da condição superficial do trecho de estudo

### 5.3.2 Análise estatística para as quatro condições de superfície avaliadas

Foram ensaiados 30 pontos para cada uma das condições avaliadas (Tabela 7). A Tabela 19 apresenta os resultados para ambas as trilhas de roda da condição de recapeamento asfáltico. A Tabela 20 apresenta os resultados para os trechos de desgaste. A partir da análise dos resultados para os trechos com recapeamento asfáltico (Tabela 19), não se identifica nenhum padrão médio ou de dispersão entre ambas as trilhas de roda avaliadas. Analogamente, não se verifica também padrões médios ou de dispersão para os trechos desgastados (Tabela 20). Desta forma, realizaram-se testes estatísticos para as quatro variáveis expressas, com a hipótese nula de que ambas as amostras são oriundas da mesma população (Tabela 21).



Pelos resultados expressos na Tabela 21, em todas as condições comparadas, não se pôde rejeitar a hipótese nula de que as amostras possuem médias iguais. Desta forma, há embasamento estatístico para descartar o efeito das trilhas de roda na condição superficial do pavimento – ou seja, não há variação dos parâmetros que condicionam a aderência pneu-pavimento da rodeira interna para a externa.

**Tabela 19** – Análise estatística descritiva para os trechos com recapeamento asfáltico

	<b>Trilha de Roda Externa</b>				<b>Trilha de Roda Interna</b>			
	<b>HS (mm)</b>	<b>BPN<sub>S</sub></b>	<b>BPN<sub>M</sub></b>	<b>ΔBPN</b>	<b>HS (mm)</b>	<b>BPN<sub>S</sub></b>	<b>BPN<sub>M</sub></b>	<b>ΔBPN</b>
$\bar{x}$	0,27	92,6	53,2	39,4	0,26	91,7	53,9	37,7
$S_d$	0,09	9,5	9,1	8,1	0,06	9,3	7,1	5,2
<b>CV</b>	34%	10%	17%	21%	23%	10%	13%	14%
<b>P<sub>15</sub></b>	0,20	84,9	44,3	34,2	0,20	82,8	44,7	33,5
<b>P<sub>85</sub></b>	0,36	104,0	61,2	47,5	0,32	100,8	61,2	43,3

**Tabela 20** – Análise estatística descritiva para os trechos com desgaste

	<b>Externa</b>				<b>Interna</b>			
	<b>HS (mm)</b>	<b>BPN<sub>S</sub></b>	<b>BPN<sub>M</sub></b>	<b>ΔBPN</b>	<b>HS (mm)</b>	<b>BPN<sub>S</sub></b>	<b>BPN<sub>M</sub></b>	<b>ΔBPN</b>
$\bar{x}$	1,26	88,5	58,7	29,9	1,23	91,7	61,2	30,5
$S_d$	0,23	14,0	8,8	13,4	0,25	13,7	9,7	10,5
<b>CV</b>	18%	16%	15%	45%	20%	15%	16%	34%
<b>P<sub>15</sub></b>	0,96	68,2	51,6	10,0	0,96	76,1	50,9	17,3
<b>P<sub>85</sub></b>	1,46	100,3	69,2	40,8	1,46	105,0	69,4	39,5

**Tabela 21** – Resultados da ANOVA fator único para as trilhas de roda

<b>Estado de Conservação</b>	<b>Variável</b>	<b>F<sub>CALCULADO</sub></b>	<b>Valor-p</b>	<b>F<sub>CRÍTICO</sub></b>	<b>Resultado</b>
Recapeamento Asfáltico	HS	0,67	0,42	4,01	Não Rejeita
	BPN <sub>S</sub>	0,15	0,70		Não Rejeita
	BPN <sub>M</sub>	0,13	0,72		Não Rejeita
	ΔBPN	0,95	0,33		Não Rejeita
Trechos com Desgaste	HS	0,23	0,63	4,01	Não Rejeita
	BPN <sub>S</sub>	0,78	0,38		Não Rejeita
	BPN <sub>M</sub>	1,10	0,30		Não Rejeita
	ΔBPN	0,04	0,84		Não Rejeita

### 5.3.3 Análise estatística para o estado de conservação

A partir dos resultados da Seção 5.3.1, os efeitos da trilha de roda na condição superficial foram desconsiderados. Desta forma, a base de dados se limitou ao estado de

conservação, cada uma com 60 observações. A Tabela 22 apresenta a análise estatística descritiva das duas amostras.

**Tabela 22** – Análise estatística descritiva para os estados de conservação

	Recapeamento Asfáltico ( $n = 60$ )				Trechos com Desgaste ( $n = 60$ )			
	HS (mm)	BPN <sub>s</sub>	BPN <sub>M</sub>	$\Delta$ BPN	HS (mm)	BPN <sub>s</sub>	BPN <sub>M</sub>	$\Delta$ BPN
$\bar{x}$	0,26	92,1	53,6	38,6	1,25	90,1	59,9	30,2
$S_d$	0,08	9,3	8,1	6,8	0,24	13,8	9,3	12,0
CV	29%	10%	15%	18%	19%	15%	15%	40%
P <sub>15</sub>	0,20	84,4	45,0	33,9	0,99	75,3	51,5	14,0
P <sub>85</sub>	0,33	101,9	61,0	44,3	1,46	101,3	69,0	40,4

A variação da macrotextura dentre os dois estados de conservação é significativa, sendo HS médio para os trechos recapeados 79,2% inferior aos trechos desgastados. Este resultado se deve ao prejuízo que tempo e polimento do tráfego causam à superfície do pavimento. Nos trechos com recapeamento, percebeu-se mais constância da macrotextura, com  $s_d$  inferior ao obtido para os trechos desgastados. BPN<sub>s</sub> apresentou comportamento similar em ambas as condições avaliadas. O parâmetro apresenta variação significativa quando avaliado para a condição molhada, sendo 10,5% inferior nos trechos recapeados. Este resultado pode ser interpretado devido à maior homogeneidade da superfície recapeada, apresentando maior susceptibilidade à presença da água do que em trechos mais desgastados.

Por se tratar de uma superfície de macrotextura fechada, os trechos com recapeamento apresentaram maior variação da microtextura – redução média de 38,6 da condição seca para a molhada. A literatura aponta que macrotextura mais fechada tende a reduzir a contribuição da microtextura dos agregados para a aderência pneu-pavimento (Aps, 2006; Pereira, 2010), especialmente na presença de água, o que também é observado pela redução média de BPN ter sido 28% maior. Nos trechos desgastados, a dispersão da macrotextura contribuiu para comportamento mais variado da microtextura molhada, (CV de 40% de  $\Delta$ BPN<sub>DESGASTE</sub>). Considerando dois  $s_d$ , estes trechos são de macrotextura “média” a “muito grossa”, que contribui para drenar a água superficial e manter a contribuição da microtextura para a aderência. Pelos resultados da Tabela 22, verificou-se, tecnicamente, que o estado de conservação do pavimento é um fator que influencia na aderência pneu-pavimento. Análise estatística ANOVA de fator único também foi conduzida (Tabela 23).

A variação da macrotextura foi estatisticamente comprovada – valor- $p$  de  $10^{-58}$ . Também, não se rejeitou a hipótese de BPN<sub>s</sub> dos estados de conservação possuírem a mesma

média, o que pode ser entendido devido à baixa diferença com relação às médias (Tabela 23). Na condição molhada e no parâmetro de variação da microtextura, todavia, rejeitou-se  $H_0$ , concluindo que o estado de conservação da via afeta macro e microtextura.

**Tabela 23** – Resultados da ANOVA fator único para os estados de conservação

Variável	F <sub>CALCULADO</sub>	Valor-p	F <sub>CRÍTICO</sub>	Resultado
HS	933,62	7E-58	3,92	Rejeita
BPN <sub>S</sub>	0,86	0,3548		<b>Não Rejeita</b>
BPN <sub>M</sub>	16,03	0,0001		Rejeita
$\Delta$ BPN	22,18	7E-06		Rejeita

#### 5.3.4 Análise estatística para o impacto das características da operação viária

Nesta seção, buscou-se avaliar a influência da operação viária, partindo da premissa que segmentos próximos às interseções sofrem maiores desgaste. Esta hipótese parte do entendimento que frenagens mais intensas ocorrem nas proximidades dos cruzamentos, devido aos semáforos de tráfego. Comparou-se a condição de pavimento molhado (BPN<sub>M</sub>) por representar a situação de maior risco. Assim, pelos pontos dos ensaios, considerou-se interseção trechos com 25 m a frente e atrás do eixo da via perpendicular (Figura 28).



**Figura 28** – Definição adotada para interseção e meio de quadra

Ao todo, foram classificados 54 pontos como interseção (20 de desgaste e 34 de recape) e 66 pontos como meio de quadra (40 de desgaste e 26 de recape). Devido à independência dos parâmetros de micro e de macrotextura, duas hipóteses nula foram testadas, considerando a igualdade das médias de HS e de BPN<sub>M</sub>. A Tabela 24 apresenta a análise estatística descritiva dos cenários avaliados. Os trechos de interseção, em média, apresentaram índices superficiais 37% e 5% inferiores aos índices de HS e BPN<sub>M</sub> do meio de quadra.

**Tabela 24** – Análise estatística descritiva para as características de operação viária

	<b>Interseção (n = 54)</b>		<b>Meio de Quadra (n = 66)</b>	
	<b>HS (mm)</b>	<b>BPNMOLHADO</b>	<b>HS (mm)</b>	<b>BPNMOLHADO</b>
$\bar{x}$	0,57	55,04	0,90	58,13
$S_d$	0,45	8,69	0,54	9,50
<b>CV</b>	79%	16%	59%	16%
<b>P<sub>15</sub></b>	0,21	45,00	0,23	51,03
<b>P<sub>85</sub></b>	1,23	63,69	1,46	66,96

A variação de 79% da macrotextura é justificada devido aos trechos de recapeamento, que reduziram a média e aumentaram o desvio padrão. Os resultados do teste de hipótese não foram conclusivos quanto à existência de significância da diferença das médias. Com valor- $p$  de 0,0005 para a macrotextura,  $H_0$  pôde ser rejeitada; todavia, o mesmo não se observou para a microtextura, com valor- $p$  de 0,068.

### 5.3.5 Análise dos resultados do método *International Friction Index (IFI)*

Primeiramente, avaliou-se a base de dados para ambas as condições superficiais com diferenças estatisticamente significativas – desgaste e recapeamento asfáltico (seco e molhado) – para eliminar observações com macrotextura  $\geq 1,50$  mm (Fuentes *et al.*, 2012). Ao todo, 6 observações (5% da amostra) foram excluídas, todas da condição com desgaste superficial. Em seguida, aplicou-se o método do IFI para a determinação do  $F_{60}$  (Tabela 25).

**Tabela 25** – Resultados do  $F_{60}$  (IFI) para as condições superficiais avaliadas

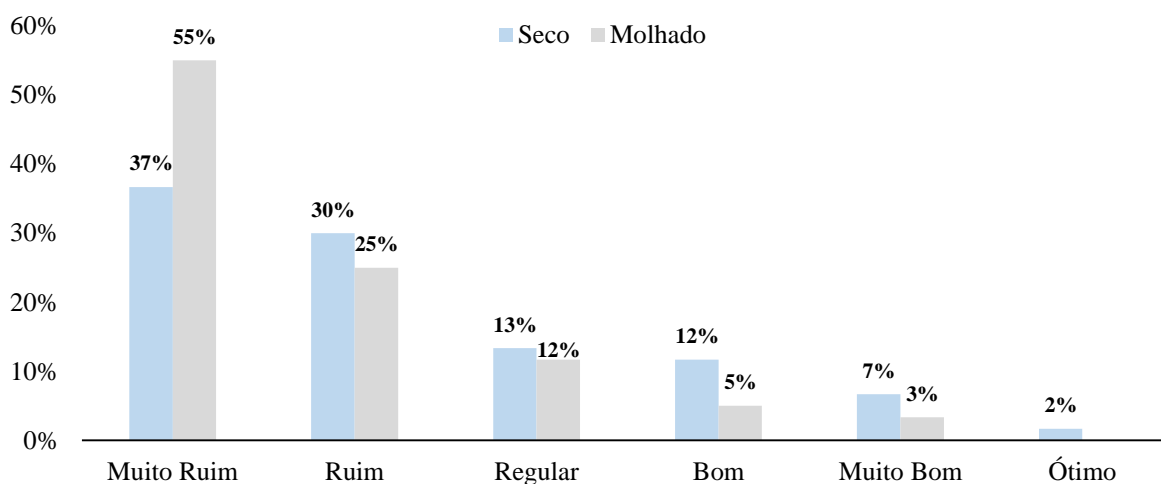
<b>Estado de Conservação</b>	<b>Superfície</b>	$\bar{x}$	$S_d$	<b>CV</b>	<b>P<sub>15</sub></b>	<b>P<sub>85</sub></b>
Recapeamento Asfáltico	Seca	0,12	0,06	54%	0,07	0,16
	Molhada	0,09	0,04	42%	0,07	0,12
Trechos com Desgaste	Seca	0,54	0,09	17%	0,44	0,64
	Molhada	0,38	0,06	17%	0,31	0,45

Pelos resultados, percebe-se o efeito da presença da água, que reduziu a microtextura em 72% e 51% para recapeamento e desgaste, respectivamente, acarretando na redução do atrito, em média, de 23% (recape) e 43% (desgaste). Nota-se também os elevados valores de CV para as superfícies recapadas, que pode ser atribuído aos valores médios mais baixos que os trechos de desgaste superficial (os quais apresentam desvios padrão semelhantes).

Mesmo após considerar o limite máximo de macrotextura para a aplicação do IFI (Fuentes *et al.*, 2012), valores muito baixos de  $F_{60}$  para as superfícies recapadas foram

observados. Comparando os parâmetros HS,  $BPN_M$  e  $BPN_S$ , constatou-se que os trechos desgastados apresentaram macrotextura, em média, 4 vezes superior em relação aos trechos com recapeamento asfáltico; todavia, esta variação foi 2% menor na condição seca e 12% maior na presença de água. Este resultado levantou a questão da adequabilidade do uso do método como forma de inferir o atrito superficial, tendo em vista que no período de sua elaboração algumas técnicas de pavimentação asfáltica ainda não haviam sido sequer desenvolvidas.

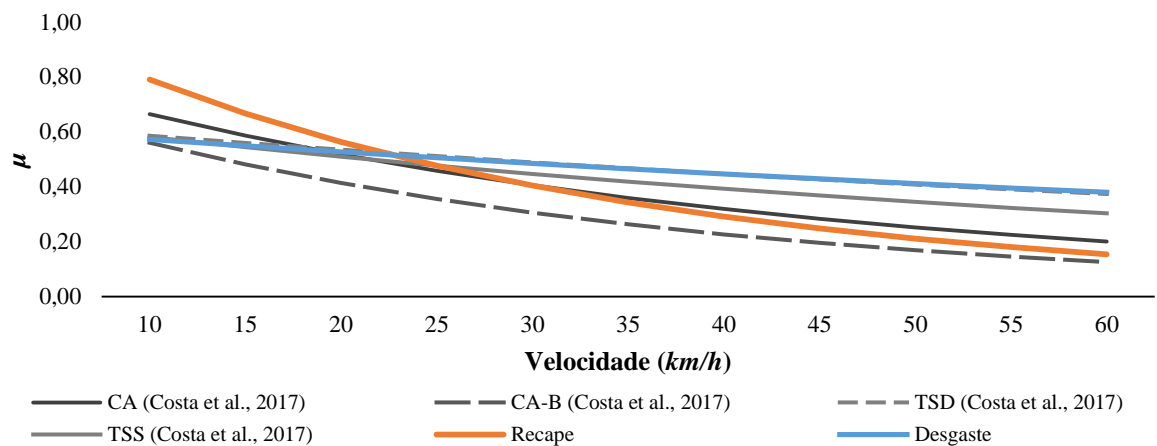
A condição de desgaste, devido à elevada macrotextura, classificou-se, pelo menos, como “muito bom”, independente da presença de água. Na condição seca, 96% das observações foram classificadas como “ótima” e na condição molhada, reduz-se para 65%. A Figura 29 apresenta os resultados para os trechos com recape, em que pode se constatar uma concentração de pontos classificados como “muito ruim”, especialmente em dias de chuva.



**Figura 29** – Classificação dos resultados de  $F_{60}$  para trechos recapeados

Compararam-se as curvas de recapeamento e de desgaste (vias molhadas) com as curvas de Costa *et al.* (2017), no intuito de identificar similaridades com as diferentes técnicas (Figura 30). Algumas técnicas avaliadas pelos autores foram excluídas por não representarem o trecho desta pesquisa, restando: *i*) Concreto Asfáltico (CA); *ii*) CA com adição de Borracha (CA-B); *iii*) Tratamento Superficial Simples (TSS); e *iv*) Tratamento Superficial Duplo (TSD).

Pela Figura 30, constatou-se a sobreposição em todos os níveis de velocidade dos trechos desgastados com TSD. Os trechos com recapeamento se assemelham ao desempenho da mistura CA. O desempenho superior para velocidades mais baixas indica melhor condição de microtextura do observado, podendo ser interpretado como superfícies mais novas, que ainda não foram muito expostas ao polimento oriundo do tráfego. Também, o desempenho inferior para velocidades maiores indica para misturas asfálticas de macrotextura mais fechada.



**Figura 30** – Curvas de  $\mu$  pela velocidade das condições superficiais avaliadas e obtidas por Costa *et al.* (2017)

### 5.3.6 Distribuição estatística dos parâmetros de micro e de macrotextura

Na inclusão da condição superficial, considerou-se apenas do trecho de recapeamento asfáltico, devido aos índices menores de aderência pneu-pavimento, evidenciando uma situação de risco maior em comparação aos trechos desgastados. Primeiramente, testou-se a hipótese nula de que a Distribuição Normal se adequava às amostras de microtextura, seca e molhada, e de macrotextura.

As Tabelas 26, 27 e 28 apresentam os resultados obtidos para  $BPN_M$ ,  $BPN_S$  e HS. A frequência esperada foi obtida pela subtração da probabilidade dos limites superior e inferior (obtida igual à distribuição normal cumulativa com média e desvio padrão da amostra). Os resultados das Tabelas 26, 27 e 28 apontam que os dados de microtextura seca e molhada podem seguir uma distribuição normal. Porém, a estatística teste superior ao crítico e a probabilidade menor que 5% para a macrotextura rejeitou a hipótese de normalidade para HS. Por se tratar de uma variável contínua e positiva, testou-se a aderência de HS à distribuição gama.

Os parâmetros da distribuição gama ( $\alpha_G$  e  $\beta_G$ ) foram obtidos pelo método dos momentos, iguais a 11,821 e 0,022. A Tabela 29 apresenta os resultados para o teste, que indica a não-rejeição da hipótese de aderência da amostra de HS à distribuição gama, tendo em vista que estatística teste (9,35) foi inferior ao valor crítico (12,59), com probabilidade de 15,5%.

Esta análise estatística determinou distribuições estatísticas para as três variáveis de condição superficial avaliadas. Para ambas as condições de microtextura, seca e molhada, foram utilizadas a distribuição normal, com média 92,12 e desvio padrão 9,33 para  $BPN_S$ , e 53,56 e 8,10 para  $BPN_M$ . Para a macrotextura, foi adotada distribuição gama com os parâmetros  $\alpha_G$  11,821 e  $\beta_G$  0,022. Estes parâmetros foram utilizados para gerar as observações aleatórias de micro e de macrotextura, obtendo o coeficiente de atrito (IFI) para cada conflito veicular.

Tabela 26 – Teste de aderência qui-quadrado para microtextura molhada (BPN<sub>M</sub>)

Classe		Frequência		$\frac{(E - O)^2}{E}$	$\chi^2_{obs}$	<i>P</i>	$\chi^2_{crítico}$
Inferior	Superior	Observado	Esperado				
32,5	36,7	3	0,84	5,51			
36,7	40,9	1	2,42	0,84			
40,9	45,1	7	5,35	0,51			
45,1	49,3	5	9,08	1,83			
49,3	53,5	9	11,85	0,69	14,33	15,8%	18,31
53,5	57,7	15	11,89	0,81			
57,7	61,9	13	9,18	1,59			
61,9	66,1	6	5,45	0,06			
66,1	70,3	0	2,49	2,49			
70,3	74,5	1	0,87	0,02			

Tabela 27 – Teste de aderência qui-quadrado para microtextura seca (BPN<sub>S</sub>)

Classe		Frequência		$\frac{(E - O)^2}{E}$	$\chi^2_{obs}$	<i>P</i>	$\chi^2_{crítico}$
Inferior	Superior	Observado	Esperado				
59,5	64,8	1	0,09	9,42			
64,8	70,1	1	0,45	0,69			
70,1	75,4	1	1,65	0,25			
75,4	80,7	1	4,44	2,66			
80,7	86	8	8,73	0,06	15,96	10,1%	18,31
86	91,3	16	12,54	0,95			
91,3	96,6	16	13,17	0,61			
96,6	101,9	7	10,10	0,95			
101,9	107,2	7	5,66	0,32			
107,2	112,5	2	2,31	0,04			

Tabela 28 – Teste de aderência qui-quadrado para macrotextura (HS)

Classe		Frequência		$\frac{(E - O)^2}{E}$	$\chi^2_{obs}$	<i>P</i>	$\chi^2_{crítico}$
Inferior	Superior	Observado	Esperado				
0,16	0,19	6	5,68	0,02			
0,19	0,23	14	8,57	3,44			
0,23	0,26	19	10,54	6,79			
0,26	0,30	7	10,56	1,20			
0,30	0,33	7	8,63	0,31	45,50	0,000%	18,31
0,33	0,37	2	5,74	2,44			
0,37	0,40	0	3,12	3,12			
0,40	0,44	1	1,38	0,10			
0,44	0,47	2	0,50	4,55			
0,47	0,51	2	0,15	23,54			

Tabela 29 – Teste de aderência qui-quadrado para HS com distribuição gama

Classe		Frequência		$\frac{(E - O)^2}{E}$	$\chi^2_{obs}$	$P$	$\chi^2_{crítico}$
Inferior	Superior	Observado	Esperado	$E$			
0,16	0,19	6	6,89	0,12	8,63	15,5%	12,59
0,19	0,23	14	10,25	1,37			
0,23	0,26	19	11,30	5,26			
0,26	0,30	7	9,96	0,88			
0,30	0,33	7	7,41	0,02			
0,33	0,51	7	10,88	1,71			

#### 5.4 Frequência e severidade dos conflitos veiculares microssimulados

São apresentados nesta seção os resultados da etapa de estimação da frequência e da severidade dos conflitos obtidos através da microssimulação. Foram avaliados 12 cenários, com variação da condição ambiental e da demanda veicular. Primeiramente, são apresentados os resultados por tipologia dos conflitos veiculares, definidos como longitudinais, laterais e transversais (Seção 5.4.1).

Em seguida, são quantificadas a severidade dos conflitos longitudinais, foco da pesquisa, pelo indicador *proxy deceleration rate to avoid the crash* (DRAC) (Seção 5.4.2). Por fim, no intuito de incluir a condição superficial na análise do desempenho da segurança viária, a severidade dos conflitos veiculares foi determinada pelo *maximum available deceleration rate* (MADR) (Seção 5.4.3).

##### 5.4.1 Análise da frequência dos conflitos microssimulados por tipo

As Tabelas 30, 31 e 32 apresentam os resultados de frequência dos conflito, bem como  $\bar{x}$  e  $sd$  do *proxy* TTC. A demanda veicular tem como base o volume da via arterial típica, de 300, 600, 900 e 1.200 *veic/h*. A partir dos resultados, percebe-se que quanto maior a exposição ao tráfego maior a incidência de conflitos, independente da natureza da ocorrência. Este aumento se deu quase que linearmente conforme se aumentou a demanda.

Constatou-se aumento de frequência de conflitos longitudinais no cauteloso (quase 3 vezes para 1.200 *veic/h* do agressivo), podendo estar ligado à representatividade do modelo de *car-following*, que representou satisfatoriamente o FS, porém aumentou a heterogeneidade comportamental veicular. É válido pontuar que, apesar de mais frequentes, os conflitos foram menos severos.



Tabela 30 – Resultados de frequência e de TTC dos conflitos do cenário seco

Estatística Descritiva	Conflito	Demanda Veicular			
		Muito Baixa	Baixa	Média	Alta
<i>n</i>	Longitudinal	2.097	4.378	6.988	10.105
	Lateral	731	2.869	5.779	8.203
	Transversal	8	34	174	287
$TTC_{\bar{x}}$ (s)	Longitudinal	1,24	1,22	1,21	1,17
	Lateral	0,87	0,80	0,80	0,80
	Transversal	0,70	0,88	1,16	1,06
$TTC_{S_d}$ (s)	Longitudinal	0,39	0,39	0,40	0,42
	Lateral	0,50	0,48	0,47	0,47
	Transversal	0,18	0,52	0,39	0,42

Tabela 31 – Resultados de frequência e de TTC dos conflitos do cenário com chuva e para condutor agressivo

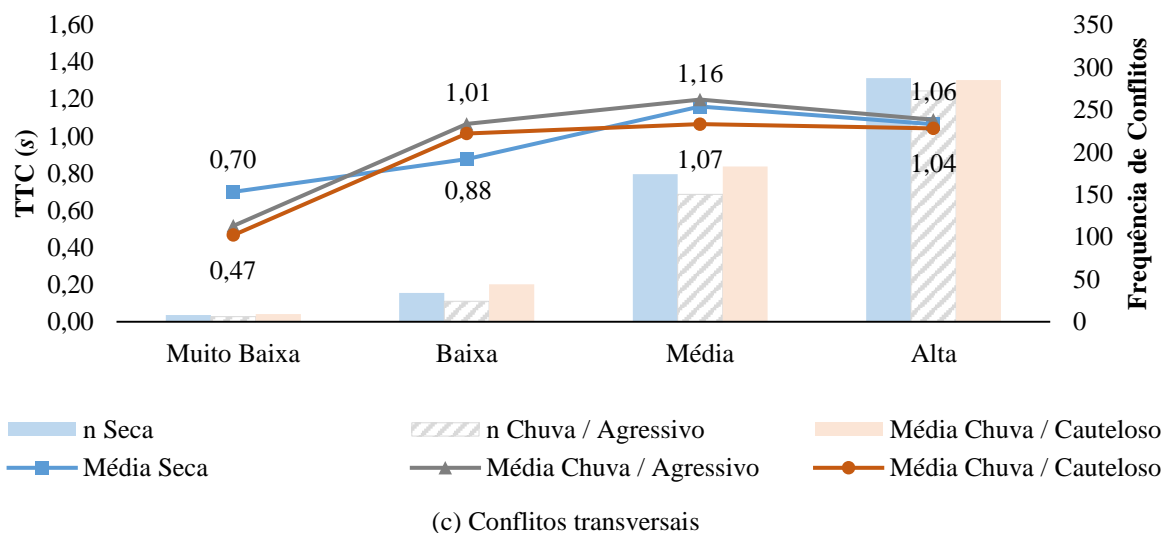
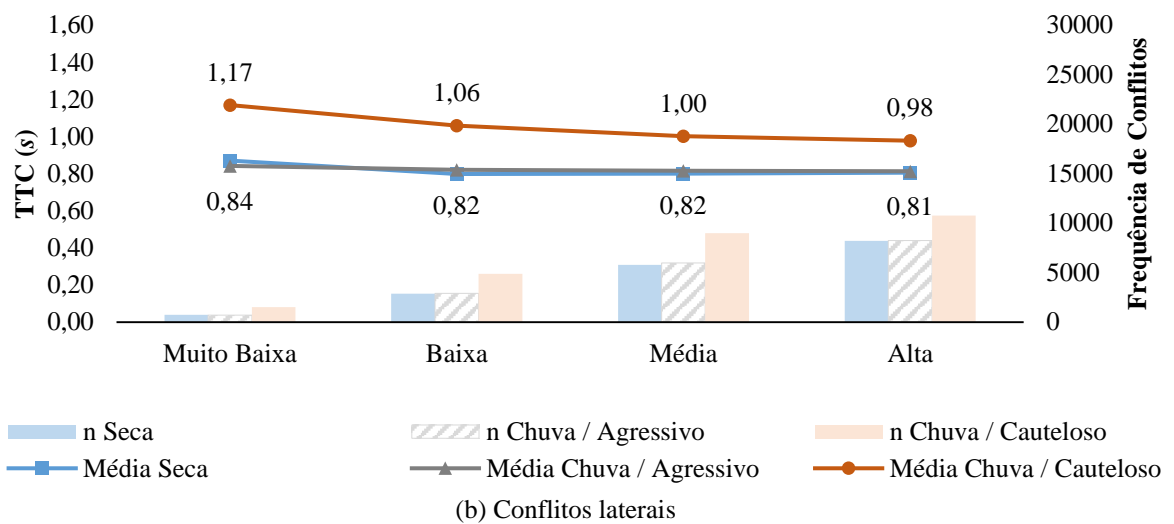
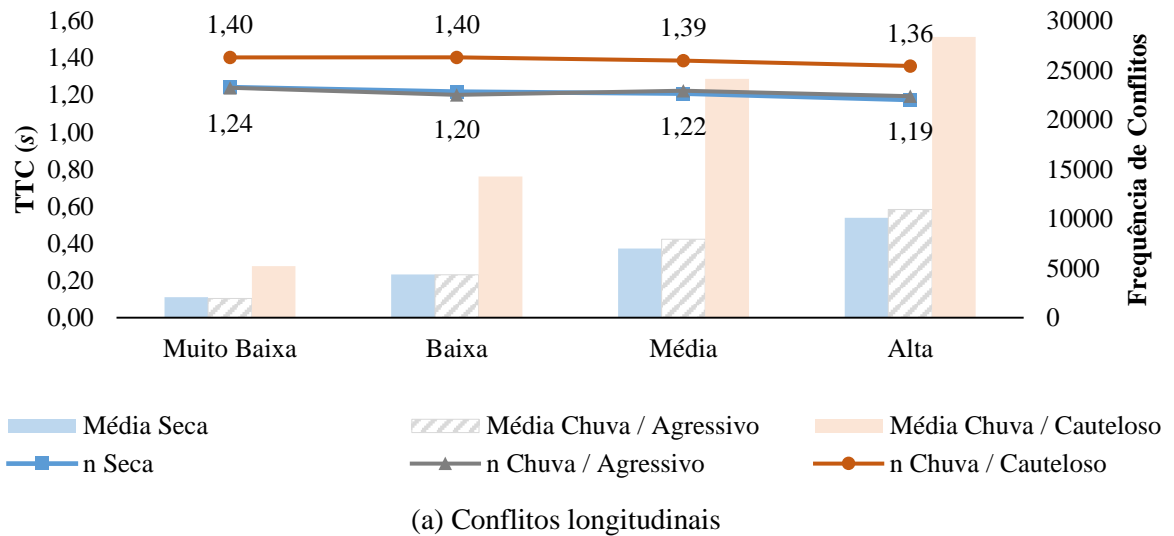
Estatística Descritiva	Conflito	Demanda Veicular			
		Muito Baixa	Baixa	Média	Alta
<i>n</i>	Longitudinal	1.967	4.337	7.926	10.937
	Lateral	711	2.897	5.953	8.229
	Transversal	6	24	150	272
$TTC_{\bar{x}}$ (s)	Longitudinal	1,24	1,20	1,22	1,19
	Lateral	0,84	0,82	0,82	0,81
	Transversal	0,52	1,07	1,20	1,09
$TTC_{S_d}$ (s)	Longitudinal	0,38	0,39	0,39	0,41
	Lateral	0,50	0,49	0,48	0,48
	Transversal	0,38	0,39	0,35	0,45

Tabela 32 – Resultados de frequência e de TTC dos conflitos do cenário com chuva e para condutor cauteloso

Estatística Descritiva	Conflito	Demanda Veicular			
		Muito Baixa	Baixa	Média	Alta
<i>n</i>	Longitudinal	5.236	14.291	24.157	28.389
	Lateral	1.501	4.874	8.964	10.761
	Transversal	9	44	183	285
$TTC_{\bar{x}}$ (s)	Longitudinal	1,40	1,40	1,39	1,36
	Lateral	1,17	1,06	1,00	0,98
	Transversal	0,47	1,01	1,07	1,04
$TTC_{S_d}$ (s)	Longitudinal	0,26	0,26	0,28	0,32
	Lateral	0,49	0,50	0,50	0,52
	Transversal	0,50	0,50	0,47	0,48

Figura 31 plota na coluna a frequência dos conflitos e nas linhas o TTC médio para os tipos longitudinal (a), lateral (b) e transversal (c). Constatou-se uma leve redução do TTC médio longitudinal conforme se variou a demanda veicular em todos os cenários, indicando aumento da severidade em torno de 2,9% (nos conflitos com chuva e condução agressiva). Para

o mesmo tipo de conflito, pode-se perceber que, apesar de mais constantes, o cenário chuva e cauteloso apresentou severidade, pelo menos, 11,4% inferior aos demais cenários.



**Figura 31** – Gráfico de frequência e de TTC médio para os tipos de conflito

Observou-se comportamento similar para os conflitos laterais, porém com maior sensibilidade à variação da demanda veicular: a severidade no maior fluxo foi 16,2% superior ao menor fluxo veicular nos conflitos chuva/cauteloso e nos demais cenários a variação foi de 3,6%. TTC menores para os cenários mais carregados (tanto longitudinal quanto lateral) podem ser interpretados devido à proximidade dos veículos nas redes mais saturadas, evidenciando uma das principais críticas ao *proxy* TTC, em que se aponta a incapacidade de ponderar a severidade dos conflitos a depender das velocidades dos veículos.

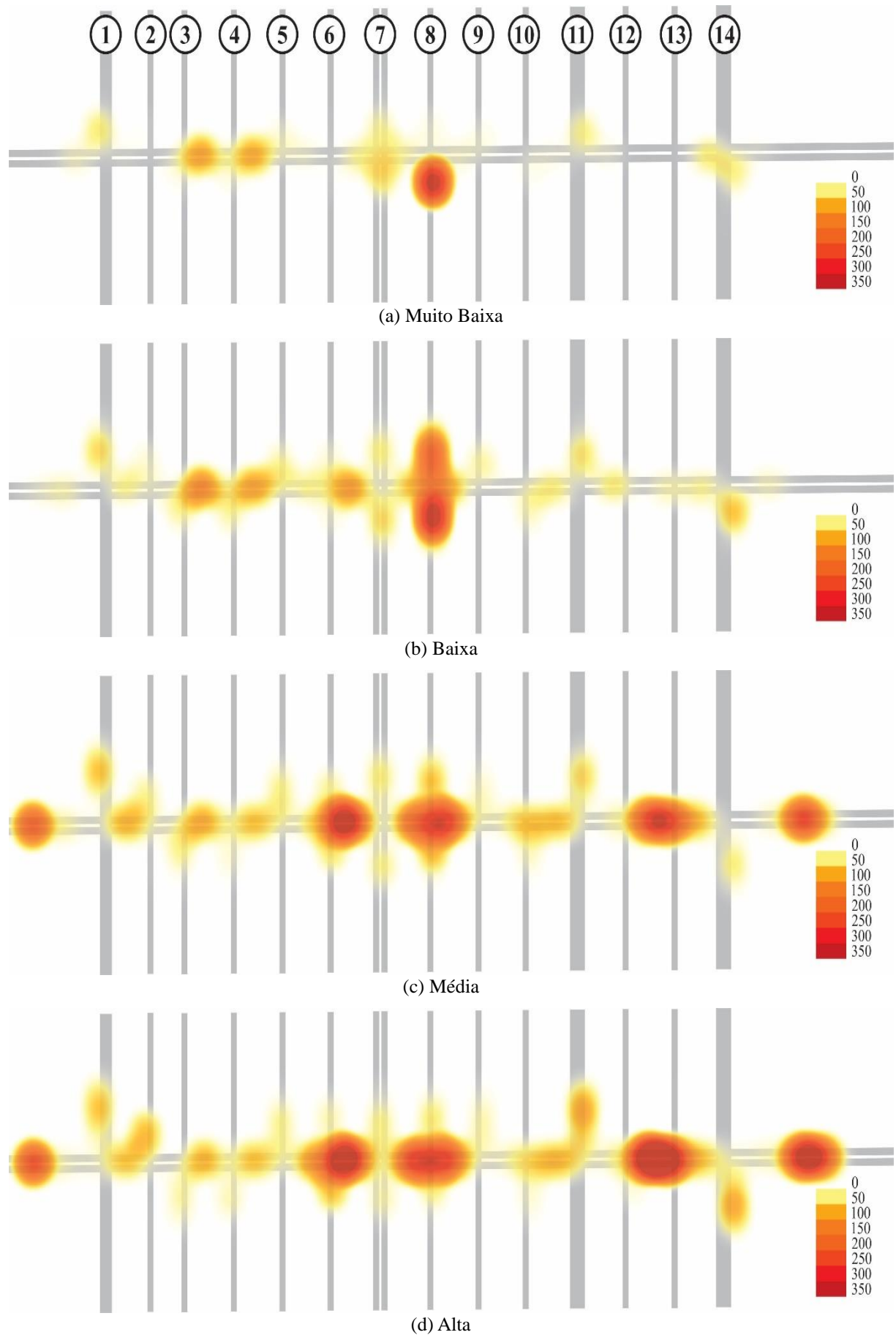
Para os conflitos transversais, apenas o aumento da frequência com o aumento da demanda foi observado. Para os quatro fluxos veiculares, os conflitos mais severos ocorreram na demanda mais baixa e os menos severos, na demanda média. Chamou-se atenção ao aumento da severidade no cenário menos carregado, sendo 39,7% mais intensos na condição seca, atingindo 56,1% de aumento em dias chuvosos com comportamento mais cauteloso.

Foram elaborados mapas de calor para os conflitos veiculares longitudinais, por se tratarem das ocorrências mais frequentes e, também, por se tratarem do escopo desta pesquisa. O objetivo desta análise é identificar as configurações dos pontos em que estes conflitos ocorrem em uma via tipicamente urbana.

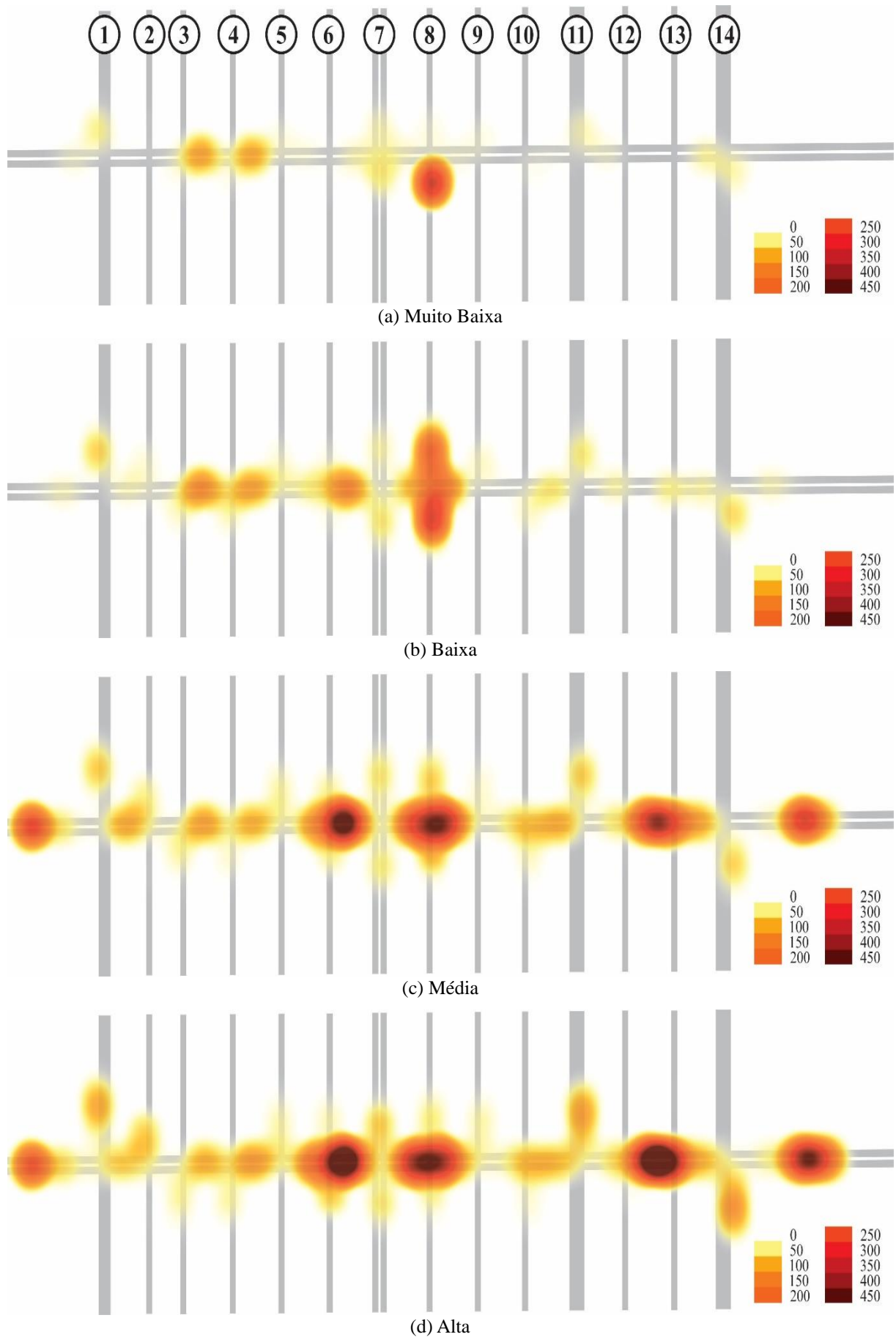
A Figura 32 representa as variações de demanda do cenário seco. Os cruzamentos numerados em 1, 3, 4, 5, 7, 9, 10, 11 e 14 são semaforizados. Pelos mapas de calor dos conflitos longitudinais (Figura 32), percebe-se uma prevalência das ocorrências nas proximidades de interseções semaforizadas. Também foram observados conflitos de meio de quadra como se observou em alguns trechos acima – por exemplo, entre as interseções não semaforizadas 12 e 13 (para as demandas média e alta). Ressalta-se que as ocorrências para este cenário se concentraram com mais intensidade em poucos pontos ao longo da via arterial típica.

Analogamente ao observado para os conflitos do cenário com ausência de chuva, observam-se que os conflitos ocorreram de forma mais concentrada em poucos pontos (Figura 33). Também é possível verificar algumas ocorrências de meio de quadra, semelhantes às observadas para o cenário seco.

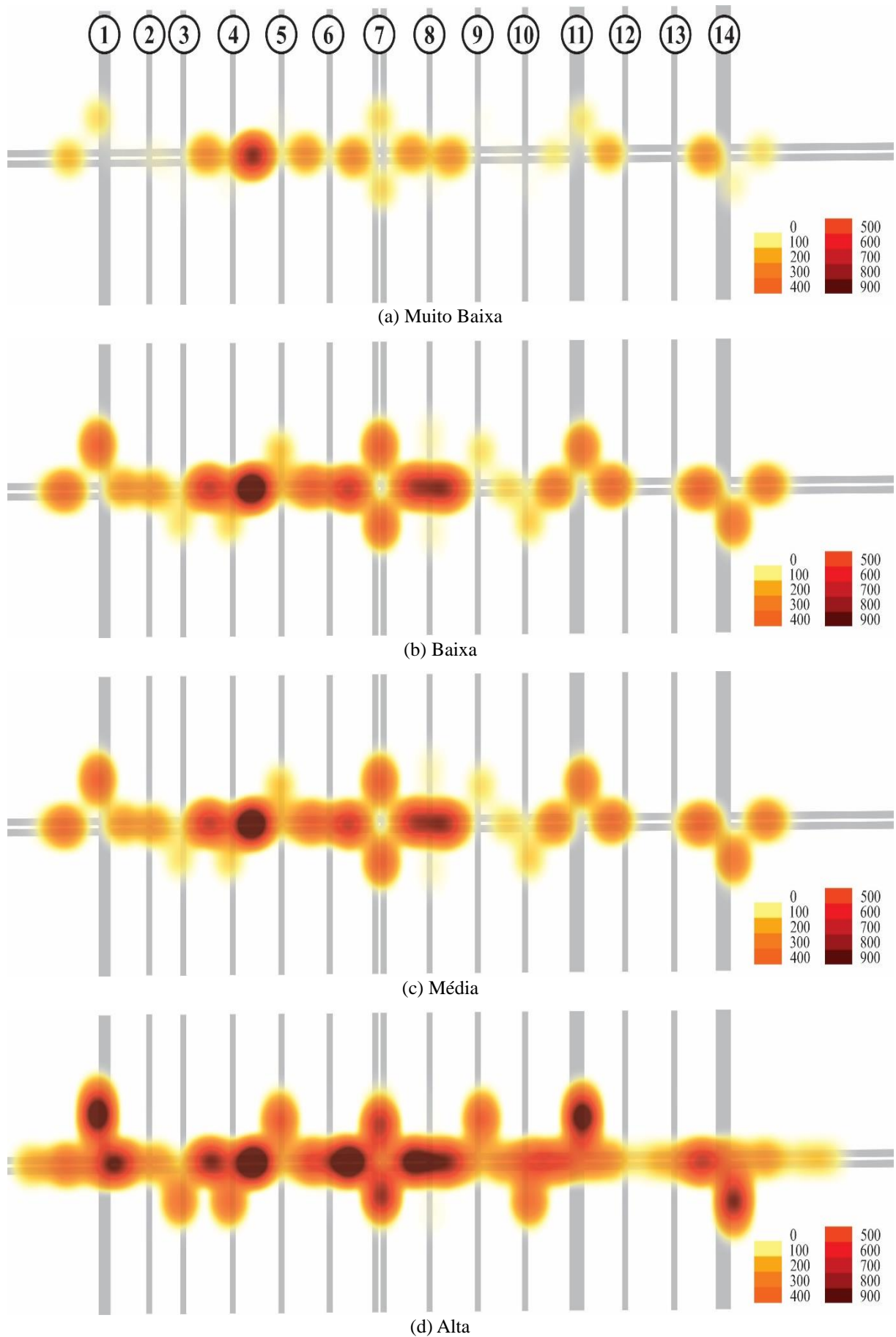
Diferente dos demais, os conflitos obtidos da simulação do comportamento mais cauteloso em dias de chuva se apresentaram de forma mais distribuída, com diversos pontos de intensidade elevada (Figuras 34). Conforme se observa nos mapas de calor para este cenário, os conflitos também ocorreram com muita intensidade nas proximidades de interseções semaforizadas, a exemplo do cruzamento 7.



**Figura 32** – Mapa de calor dos conflitos longitudinais para o cenário seco



**Figura 33** – Mapa de calor dos conflitos longitudinais para o cenário chuva e agressivo



**Figura 34** – Mapa de calor dos conflitos longitudinais para o cenário chuva e cauteloso

#### 5.4.2 Análise da severidade dos conflitos microssimulados pelo DRAC

Foram considerados apenas os conflitos longitudinais na mesma faixa de rolamento, que representam de 54% a 78% dos todos conflitos, devido às dificuldades em representar a frenagem composta (lateral e longitudinal) e em incorporá-la no DRAC. A Tabela 33 apresenta os resultados de DRAC.

A partir dos resultados, percebe-se que quanto maior a demanda, menor a severidade dos conflitos (DRAC). Devido ao aumento do fluxo, as velocidades tendem a reduzir, o que se reflete na frenagem necessária para evitar colisões. Analisando os resultados dos percentis, percebe-se que os conflitos mais severos (DRAC) são observados nos cenários de demanda veicular mais reduzida, com reduções de 9,1%, 54,7% e 75,6% do P85 das demandas média para baixa dos cenários sem chuva, com chuva e agressivo e com chuva e cauteloso, respectivamente. Este resultado pode ser interpretado como o efeito da facilidade em atingir velocidades mais elevadas devido à demanda reduzida, culminando em conflitos mais severos.

**Tabela 33** – Resultados do DRAC para os cenários avaliados

<b>Cenário</b>	<b>Demanda</b> <sup>(1)</sup>	$\bar{x}$ (m/s <sup>2</sup> )	$S_d$ (m/s <sup>2</sup> )	P <sub>15</sub> (m/s <sup>2</sup> )	P <sub>85</sub> (m/s <sup>2</sup> )
<b>Seca</b>	Muito Baixa	0,88	0,81	0,05	1,83
	Baixa	0,64	0,82	0,02	1,72
	Média	0,35	0,63	0,01	0,78
	Alta	0,29	0,97	0,01	0,35
<b>Chuva / Condutor Agressivo</b>	Muito Baixa	0,76	0,80	0,03	1,78
	Baixa	0,52	0,75	0,01	1,64
	Média	0,30	0,59	0,01	0,40
	Alta	0,26	0,76	0,01	0,32
<b>Chuva / Condutor Cauteloso</b>	Muito Baixa	0,20	0,34	0,02	0,24
	Baixa	0,14	0,29	0,01	0,22
	Média	0,12	0,27	0,01	0,20
	Alta	0,12	0,30	0,01	0,19

<sup>(1)</sup> Com base nos volumes adotados de 300, 600, 900 e 1.200 *veic/h* da via arterial típica

O resultado também é constatado pela frequência das classes de Hydén (1996), em que se observa redução percentual das reações mais agravadas conforme se aumenta o fluxo veicular (Figura 35). Como exemplo, no cenário da condição seca se observa uma redução de 6% para 2% dos conflitos de reação significativa necessária. Também, ressalta-se que, apesar de registros mais frequentes de todos conflitos, o cenário chuva/cauteloso apresentou os conflitos na sua grande maioria de manobra adaptativa, pouco sensível à variação da demanda.

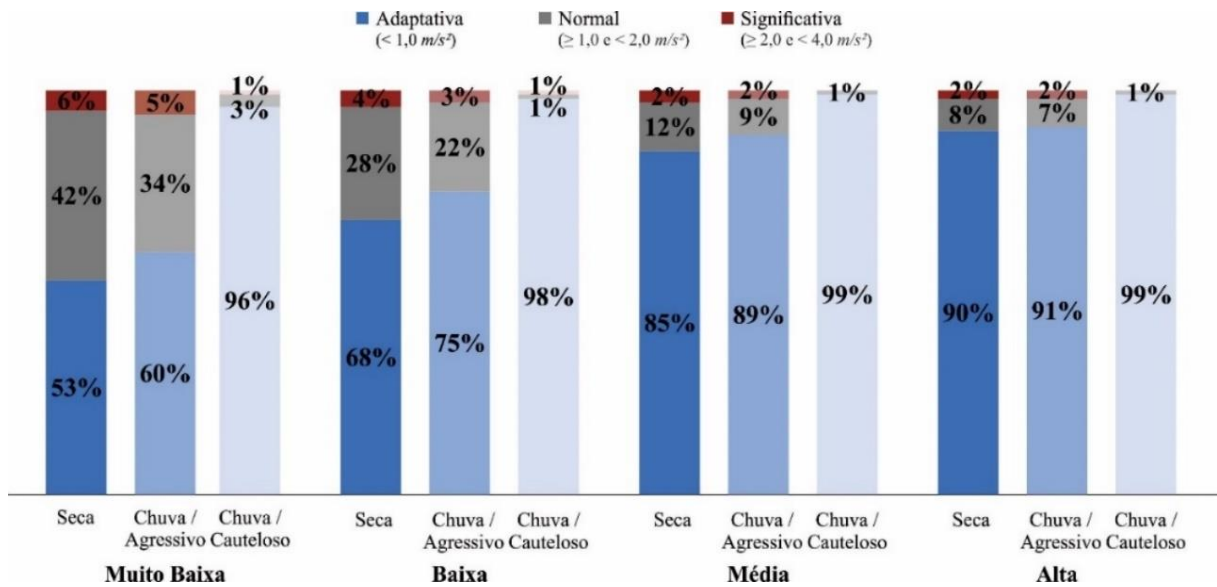


Figura 35 – Frequência por classe de conflitos para os cenários avaliados

#### 5.4.3 Análise da severidade dos conflitos microsimulados pelo MADR

Velocidade de deslocamento e características dos veículos são importantes na determinação da severidade dos conflitos. Entretanto, externalidades podem contribuir para minimizar ou maximizar os riscos. Assim, um dos objetivos de pesquisa é propor um método para incorporar a condição superficial na SV, através dos conflitos obtidos da microsimulação.

A partir do modelo de frenagem adotado (Canale, 1989), tem-se a dimensão do impacto do atrito superficial no potencial de desenvolver desacelerações. A partir da Tabela 10 (Seção 4.5.3), que apresenta os intervalos das variáveis consideradas pelo modelo proposto por Canale (1989), são definidos seis tipos distintos de veículos, conforme propostos pela Tabela 34.

Tabela 34 – Constantes e variáveis adotadas para avaliar os impactos no MADR

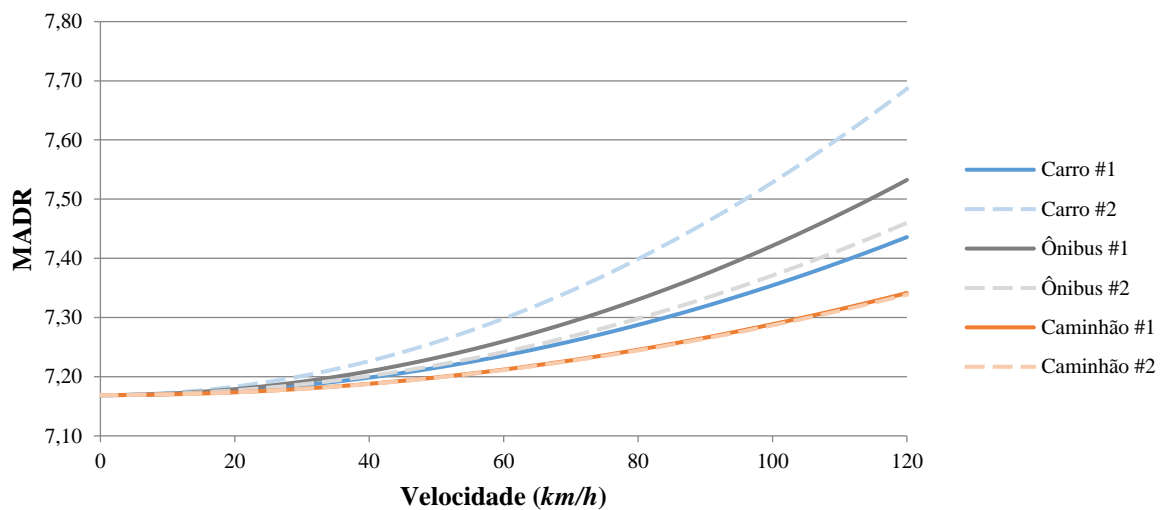
	Carro #1	Carro #2	Ônibus #1	Ônibus #2	Caminhão #1	Caminhão #2
$g$ ( $m/s^2$ )				9,81		
$\gamma_b$				1,04		
$\rho$ ( $kg/m^3$ )				1,1644		
$m$ (kg)	1.000	2.000	8.000	16.000	16.000	30.000
$C_a$	0,25	0,45	0,60	0,70	0,80	1,00
$A$ ( $m^2$ )	1,30	2,80	5,90	8,10	4,20	6,20

As Figuras 36 e 37 apresentam MADR *versus* velocidade, considerando cenários de atrito desfavorável ( $\mu = 0,25$ ) e favorável ( $\mu = 0,75$ ), evidenciando a importância da condição

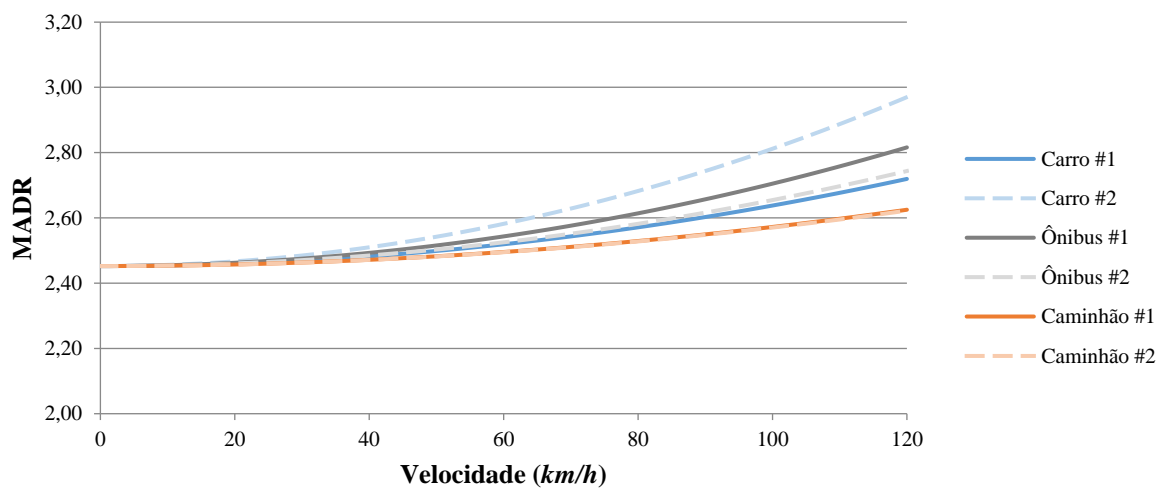


superficial nas taxas de frenagens. Tomando como exemplo a faixa de velocidade de 120 km/h, onde se evidencia o impacto de  $\mu$ , observa-se variação de 5 a 13% entre os tipos de veículos considerados. Ressalta-se que o carro #2, capaz de desenvolver até 7,70  $m/s^2$  em atrito favorável, tem seu potencial de frenagem reduzido em mais de 60% em cenário desfavorável de atrito.

Evidenciada quantitativamente os impactos do atrito superficial na severidade dos conflitos veiculares, a inclusão de  $\mu$  no indicador *proxy* MADR é realizada para cada conflito obtido da simulação, dada a natureza estocástica do fenômeno. Pelas larguras e comprimentos veiculares obtidos do detalhamento de cada conflito, reportados pelo SSAM, pôde-se definir se o veículo seguidor se tratava de um carro, de um ônibus ou de um caminhão; assim, sorteou-se aleatoriamente massa, coeficiente de arrasto e área frontal para cada conflito.



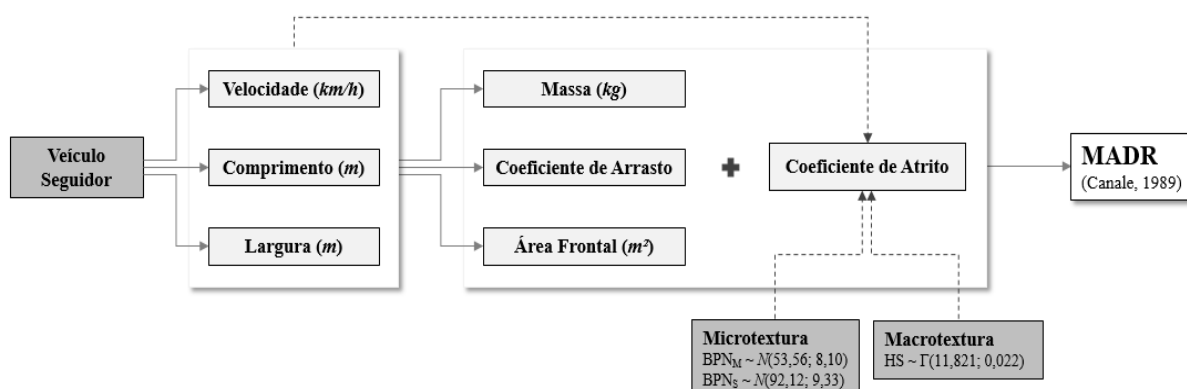
**Figura 36** – Curva de MADR pela velocidade por tipo veicular para  $\mu = 0,75$



**Figura 37** – Curva de MADR pela velocidade por tipo veicular para  $\mu = 0,25$

A natureza não-determinística do atrito foi discutida ao longo deste trabalho, o que culminou na utilização de distribuições de probabilidade normal e gama para representar os parâmetros de microtextura (seca e molhada) e de macrotextura (Seção 5.3.6). Para cada conflito veicular, são gerados dados de micro e de macrotextura segundo suas distribuições, que, aplicados ao método do IFI, determinam o coeficiente de atrito à velocidade de deslocamento do veículo seguidor no instante mais crítico do conflito.

A Figura 34 busca representar de forma sistêmica o método para a determinação do MADR, considerando variados tipos veiculares. Além disso, incorpora-se a natureza não-determinística do atrito no cálculo deste indicador *proxy*, um dos objetivos desta pesquisa.



**Figura 38** – Obtenção do MADR a partir das características veiculares e da condição superficial

#### 5.4.3.1 Análise da severidade pelo MADR

Para cada conflito veicular, foram gerados dados aleatórios para determinar MADR: *i*) microtextura pela distribuição normal; *ii*) macrotextura pela distribuição gama; *iii*) massa veicular; *iv*) coeficiente de arrasto; e *v*) área frontal veicular, respeitando os intervalos expressos na Tabela 10 para cada tipo de veículo. A Tabela 35 compila os resultados de MADR, com média, desvio padrão, 15° e 85° percentis. A Figura 35 ilustra os valores médios.

Os resultados acima apontam para a dependência do MADR à demanda veicular e ao comportamento dos condutores. Quanto maior o fluxo veicular, maior a média de MADR, explicado devido à redução da velocidade, que contribui para aumentar a aderência. MADR médio aumentou 5, 13 e 18% da menor para a maior demanda veicular dos cenários seco, chuva/agressivo e chuva/cauteloso, respectivamente.

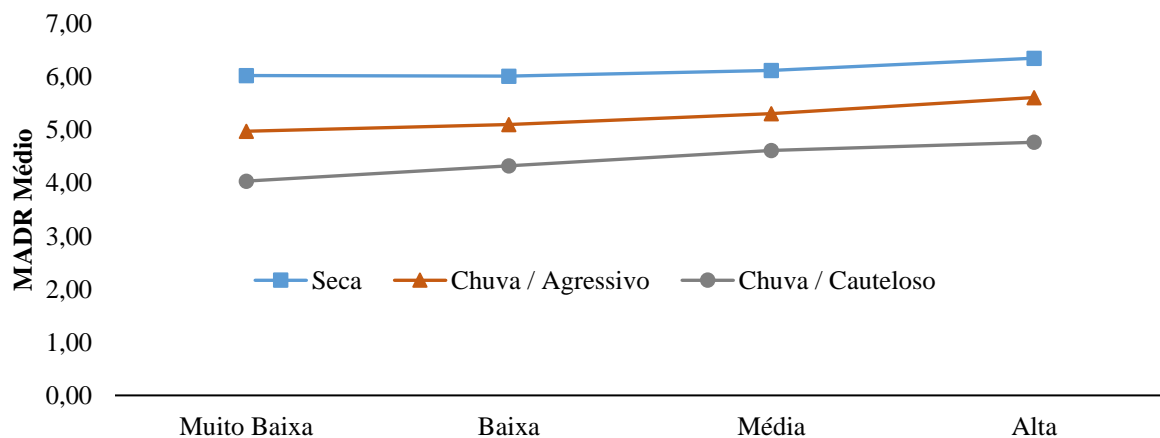
Os cenários com redução do atrito superficial devido à presença de água, conforme esperado, apresentaram médias de MADR inferior à condição seca. O comportamento mais

agressivo acarretou em médias superiores em relação ao mais cauteloso de 15 a 23%, atribuído ao efeito aerodinâmico e ao coeficiente de resistência ao rolamento.

**Tabela 35** – Valores de MADR para os cenários avaliados

Cenário	Demanda <sup>(1)</sup>	$\bar{x}$ (m/s <sup>2</sup> )	$S_d$ (m/s <sup>2</sup> )	P <sub>15</sub> (m/s <sup>2</sup> )	P <sub>85</sub> (m/s <sup>2</sup> )
<b>Seca</b>	Muito Baixa	6,02	1,87	3,91	8,30
	Baixa	6,01	1,88	3,91	8,29
	Média	6,12	1,90	3,91	8,40
	Alta	6,35	1,86	4,11	8,54
<b>Chuva / Agressivo</b>	Muito Baixa	4,97	1,88	3,01	7,28
	Baixa	5,10	1,87	3,08	7,35
	Média	5,30	1,90	3,21	7,58
	Alta	5,61	1,94	3,39	7,91
<b>Chuva / Cauteloso</b>	Muito Baixa	4,04	1,60	2,67	5,69
	Baixa	4,32	1,72	2,74	6,25
	Média	4,62	1,81	2,85	6,76
	Alta	4,77	1,83	2,93	6,95

<sup>(1)</sup> Com base nos volumes adotados de 300, 600, 900 e 1.200 *veic/h* da via arterial típica

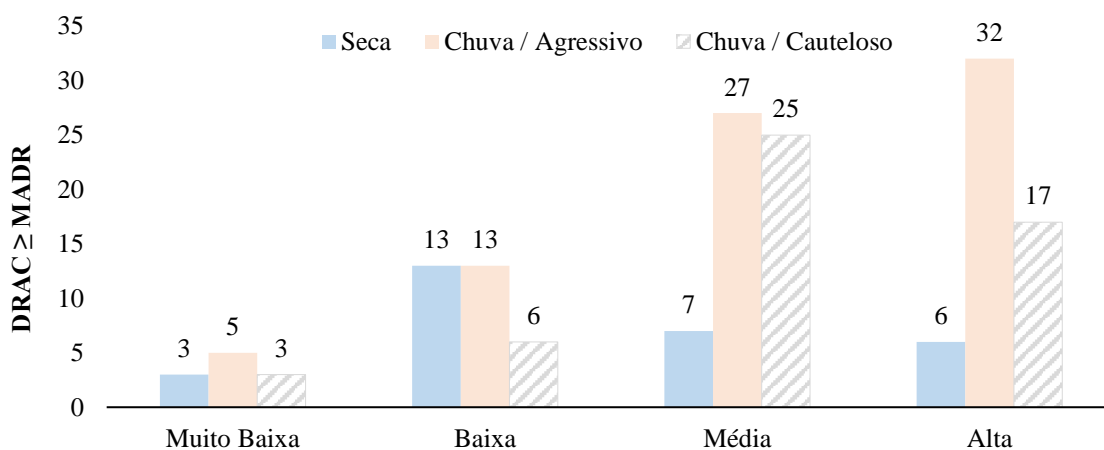


**Figura 39** – Valores médios de MADR por cenário avaliado

## 5.5 Comparação da segurança viária nas condições molhada e seca

Nesta seção, o desempenho da segurança viária de cada um dos cenários representados é avaliado, após a análise da frequência dos conflitos veiculares microsimulados e da severidade destas interações através do indicador *proxy* TTC, além da quantificação dos indicadores *proxy* DRAC e MADR para cada interação veicular longitudinal. Os índices de cada conflito registrado são comparados, identificando as ocorrências em que manobras mais

evasivas e abruptas são necessárias, quando a frenagem necessária (DRAC) for igual ou superior à disponível (MADR). A Figura 36 apresenta as quantidades de eventos em que  $DRAC \geq MADR$  registrados em todas as 30 simulações de cada cenário de fluxo e de comportamento simulados.



**Figura 40** – Análise das observações por cenário com  $DRAC \geq MADR$

Quando analisada a frequência absoluta das ocorrências  $DRAC \geq MADR$ , não se observa comportamento padrão com relação à variação dos cenários da condição ambiental/comportamento dos condutores. Chama-se atenção, todavia, ao aumento da frequência de situações de risco conforme se aumenta o fluxo veicular para o cenário de maior comprometimento da segurança viária devido à condição ambiental – chuvoso com condutores agressivos – que pode ser justificada pela combinação de velocidades maiores com aderência pneu-pavimento reduzida.

Por representarem a maioria das observações, as interações veiculares com  $DRAC < MADR$  foram representadas através da razão destes indicadores *proxy*. O resultado, representando pela letra  $p$ , pode ser interpretado como o quanto foi “consumido” da taxa de frenagem disponível pelo veículo conflitante; quanto mais próximo de 1,0, maior o risco da interação. A Tabela 36 apresenta os resultados para os respectivos cenários.

Os resultados apontam para a relação do coeficiente  $p$  com o aumento do fluxo veicular, com  $p_{médio}$  mínimo para as demandas veiculares mais elevadas, bem como se observou para o indicador MADR. Este resultado pode ser justificado devido à influência da velocidade, que tende a ser mais reduzida em cenários com elevado volume veicular: com menor velocidade, tanto os veículos estão mais próximos quanto tendem a apresentar diferença de velocidade menores, que contribui para valores baixos de DRAC; além disso, contribuem para a redução

dos efeitos da força aerodinâmica e do coeficiente de resistência ao rolamento que agem em prol da desaceleração, reduzindo os índices de MADR.

**Tabela 36** – Valores de  $p$  para os cenários avaliados

<b>Cenário</b>	<b>Demanda</b>	$\bar{x}$	$S_d$	<b>P<sub>15</sub></b>	<b>P<sub>85</sub></b>
<b>Seca</b>	Muito Baixa	0,10	0,13	0,007	0,241
	Baixa	0,09	0,18	0,004	0,219
	Média	0,07	0,14	0,001	0,162
	Alta	0,05	0,22	0,001	0,070
<b>Chuva / Agressivo</b>	Muito Baixa	0,13	0,21	0,006	0,275
	Baixa	0,10	0,19	0,003	0,233
	Média	0,07	0,20	0,002	0,095
	Alta	0,06	0,21	0,001	0,072
<b>Chuva / Cauteloso</b>	Muito Baixa	0,05	0,08	0,005	0,086
	Baixa	0,04	0,08	0,002	0,061
	Média	0,03	0,08	0,002	0,064
	Alta	0,03	0,08	0,001	0,057

Os efeitos da redução da aderência superficial também contribuem para a redução dos índices de MADR, entretanto, no cenário mais cauteloso, esta redução tende a ser minimizada devido ao comportamento mais defensivo dos condutores. Com estes argumentos, compreende-se o porquê do maior “consumo” de taxa de frenagem ocorrer para o cenário de chuva e com condutor agressivo: combinação de DRAC mais elevado devido à agressividade e de MADR mais reduzido devido ao comprometimento da condição superficial devido à película d’água presente no pavimento.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As considerações finais desta Dissertação de Mestrado foram divididas em duas seções. A primeira traça comentários gerais dos objetivos e dos resultados e conclusões obtidos do esforço aqui implementado. Em seguida, a Seção 6.2 finaliza com as sugestões para trabalhos futuros.

### 6.1 Resultados e conclusões da pesquisa

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a influência que a condição superficial exerce na segurança viária (SV). A motivação para este estudo partiu do entendimento de que a chuva pode afetar duplamente no trânsito, tanto nos níveis de segurança devido à redução da aderência pneu-pavimento quanto no desempenho operacional do tráfego devido ao ajuste comportamental (ou não) dos condutores em dias chuvosos.

Partindo deste entendimento, entretanto sem compreensão acurada da magnitude do impacto destes efeitos, buscou-se avaliar de que forma seria possível incluir a condição superficial de pavimentos nos estudos de desempenho de segurança viária (DSV). Assim, propôs-se avaliar diferentes cenários em um ambiente tipicamente urbano de Fortaleza/CE através da quantificação da SV por indicadores *proxy* de conflitos veiculares. Esta abordagem foi adotada diante da possibilidade da implementação da ferramenta de simulação microscópica de tráfego, com a qual se consegue obter maior quantidade de observações com registros precisos da dinâmica dos veículos microsimulados.

Além disso, os *proxy* avaliados quantificam a severidade dos conflitos veiculares através das taxas de frenagem disponível (*maximum available deceleration rate*, MADR) e possível (*deceleration rate to avoid the crash*, DRAC), que possibilitam a inclusão da aderência pneu-pavimento. Tratando-se de um cenário tipicamente urbano, os dados que caracterizam a condição superficial (microtextura e macrotextura) foram obtidos de uma via arterial típica de Fortaleza, possibilitando inferências estatísticas e a determinação de diversas estimativas de coeficiente de atrito, através da implementação do *International Friction Index* (IFI).

Foram coletados dados de dois tipos distintos de condição superficial para cada uma das trilhas-de-roda (externa e interna) com a premissa de que se tratavam de extremos: *i*) trechos com desgaste superficial; e *ii*) trechos com recapeamento asfáltico. Logo, quatro condições distintas foram avaliadas, sendo coletados trinta pontos para cada condição, a fim de realizar inferências estatísticas resguardadas no Teorema do Limite Central (TLC). Para representar o

atrito superficial em vias secas e molhadas, foram realizados ensaios de mancha de areia para caracterizar a macrotextura (HS) e de pêndulo britânico com a superfície seca e molhada para caracterizar a microtextura seca ( $BPN_S$ ) e molhada ( $BPN_M$ ), respectivamente. Combinados, estes parâmetros de micro (molhada e seca) e de macrotextura resultam no coeficiente de atrito, através do método do IFI (a depender da velocidade).

Não houve evidências estatísticas para considerar a diferença das médias entre as trilhas-de-roda avaliadas. Todavia, conforme esperava-se, os dados apontaram para a existência de variação dos parâmetros de condição superficial para os dois tipos de estado de conservação avaliados. Comparando as duas condições, notou-se uma significativa superioridade da macrotextura dos trechos de desgaste (quase quatro vezes maior); a microtextura seca, por sua vez, foi bastante similar, sendo o trecho de desgaste apenas 2,2% inferior, sendo mais expressiva na condição molhada (recapes asfálticos 10,5% inferior aos trechos desgastados). Esta diferença se replicou nos valores médios de coeficiente de atrito. Na comparação do atrito para superfície molhada *versus* seca de ambos os estados de conservação avaliados, mesmo com a redução observada de 72% e 51% da microtextura de pavimentos molhados em recapamentos asfálticos e em trechos desgastados, respectivamente, a variação do atrito superficial não foi tão expressiva (6% para recape e 10% para desgaste)

Para os trechos desgastados, o método do IFI reportou resultados superiores a 1,0, considerados como inconsistentes devido à definição de coeficiente de atrito. Assim, as inferências estatísticas para a geração aleatória de dados de micro e de macrotextura foram conduzidas apenas com as observações de recapeamento asfáltico. Os dados coletados de microtextura seca e molhada apresentaram ambos aderência à distribuição estatística normal (média de 92,12 e desvio padrão de 9,33 para  $BPN_S$ ; média de 53,56 e desvio padrão de 8,10 para  $BPN_M$ ); a macrotextura, por sua vez, apresentou significância estatística com a distribuição gama ( $\alpha_G$  de 11,821 e  $\beta_G$  de 0,022).

Tendo o objetivo de avaliar cenários de diferentes condições ambientais, buscou-se o entendimento dos impactos destes fenômenos no comportamento de tráfego. A partir da revisão da literatura, tanto velocidade de fluxo livre (VFL) quanto fluxo de saturação (FS) foram avaliados, a partir de dados reais de campo. Das três amostras avaliadas, duas rejeitaram a hipótese nula de igualdade das médias – ou seja, havia diferenças da VFL em dias de chuva versus dias normais. Todavia, a variação máxima de 3,8% representa um ajuste de apenas 2 *km/h*, que pode ser interpretado, tecnicamente, como não significativo. Já para o FS observou-se redução média de 8% em dias de precipitação em relação a dias de condição ambiental

normal. Estes resultados confirmaram a premissa inicial de que os condutores têm seu comportamento ajustado em resposta aos estímulos das precipitações.

No intuito de avaliar o DSV com o uso da microssimulação, um dos objetivos desta pesquisa tratou da representação da variação do comportamento no processo de condução diante dos estímulos externos. Foram representados três cenários distintos: *i*) condição normal (seca); *ii*) dia de chuva e condutores com reduzido ajuste aos riscos (comportamento agressivo); e *iii*) dia de chuva com elevado ajuste (comportamento cauteloso). Considerou-se o cenário agressivo e cauteloso como, respectivamente, o 15° e 85° percentil da redução percentual do FS (-2% e 12%). Estes cenários balizaram os esforços de calibração dos parâmetros de *car-following* do modelo W74 do VISSIM 8.0, com *bx\_add* e *bx\_mult* como parâmetros-alvo da calibração. Considerados iguais devido à dificuldade de compreendê-los em campo, os resultados da calibração dos três cenários foi 4,70 para dias normais, 5,00 para dias de chuva combinado ao comportamento agressivo e 6,50 para dias de chuva com ajuste conservador (cauteloso) às condições de segurança.

Vias tipicamente urbanas apresentam variação de demanda veicular, ao decorrer dos dias, o que pode alterar o comportamento da corrente de tráfego. Por este entendimento, considerou-se neste estudo a variação da demanda veicular nas análises em quatro níveis diferentes para cada cenário de condição ambiental/comportamento de condução: *i*) demanda veicular muito baixa (300 *veic/h*); *ii*) baixa (600 *veic/h*); *iii*) média (900 *veic/h*); e *iv*) alta (1.200 *veic/h*). As faixas do fluxo veicular foram baseadas em volumes reais obtidos de um conjunto de vias arteriais típicas de Fortaleza/CE. Apesar da relevância do uso das motocicletas no tráfego geral de Fortaleza (sendo em torno de 15% do tráfego no pico em vias arteriais), este modo de transporte não foi incorporado à simulação devido às dificuldades de representar este comportamento na simulação. Doze cenários ao todo foram avaliados quanto à frequência e à severidade dos conflitos veiculares obtidos através da simulação microscópica de tráfego.

A análise do DSV foi feita pela frequência dos diferentes tipos de conflitos veiculares, pelo indicador *proxy* temporal *time to collision* (TTC) e, em específico para os conflitos longitudinais, pelos indicadores *proxy* de desaceleração DRAC e MADR. Optou-se pela análise dos conflitos longitudinais pelo entendimento de que tais ocorrências são mais comuns nos ambientes urbanos, além de se adequarem ao modelo retilíneo de frenagem veicular. Como pôde-se constatar da análise dos conflitos veiculares, esta tipologia de interação representou de 54% a 78% das ocorrências registradas.

Resultados da análise do indicador *proxy* TTC apontou para o aumento da severidade dos conflitos conforme se aumentou a demanda veicular, o que corroborou com a



revisão da literatura que aponta para a necessidade de incorporar o movimento veicular em indicadores *proxy*. Já com o DRAC, a redução da severidade dos conflitos com o aumento da demanda veicular foi de 40% a 67%. Também, devido ao ajuste da velocidade e da distância de segurança, o cenário chuva/cauteloso apresentou os menores  $DRAC_{\text{médio}}$ , de 0,40 (fluxo alto) a 0,20 (fluxo muito baixo).

Considerando a variação do tipo veicular e da condição superficial, o comportamento médio do MADR apresentou relação positiva com a demanda veicular, justificado por causa da maior dificuldade no desenvolvimento de velocidades mais elevadas. Na comparação dos cenários de demanda máxima e mínima avaliados, o  $MADR_{\text{médio}}$  aumentou 5%, 13% e 18% para os dias de sol, os dias de chuva com comportamento agressivo e os dias de chuva com comportamento cauteloso, respectivamente.

Por fim, esta pesquisa buscou avaliar a ocorrência de interações que necessitassem de manobras evasivas para evitar as colisões, tendo em vista que a taxa de frenagem necessária (DRAC) era superior à frenagem máxima disponível (MADR). Como um dos principais resultados, observou-se que a frequência de situações  $DRAC \geq MADR$  sempre foi superior na situação mais adversa (pavimento molhado e comportamento agressivo), sendo até 4,3 vezes superior à condição de pavimento seco para a demanda veicular alta. Este resultado aponta para a importância da análise do DSV através da incorporação das características e da dinâmica veicular e da condição de atrito superficial que o método proposto nesta pesquisa sugere.

As demais interações foram avaliadas pela razão  $DRAC/MADR$ ,  $p$ , constatada como inversamente proporcional ao volume veicular. Podendo ser interpretada como o “consumo” da taxa de frenagem disponível pelo veículo conflitante, a combinação de DRAC mais elevado devido à agressividade e de MADR mais reduzido devido ao comprometimento da condição superficial em vias molhadas teve seus reflexos no cenário de maior adversidade, com  $p$  sempre superior aos demais cenários avaliados.

## 6.2 Sugestões para trabalhos futuros

Com o objetivo de incrementar a contribuição metodológica da inclusão da condição superficial nas análises de segurança viária, são feitas sugestões em frentes relacionadas à determinação da aderência pneu-pavimento, à implementação da ferramenta de simulação microscópica, à análise do comportamento dos condutores sob condições ambientais adversas e à análise do desempenho da segurança viária.

Primeiramente, sugere-se a utilização de métodos contínuos para a medição do atrito superficial dos pavimentos. Esta limitação, apesar de já previamente reconhecida, ocorreu por se tratar de norma em vigência no Brasil. O uso de equipamentos mais sofisticados possibilita a obtenção de perfis longitudinais, precisos e realísticos, reportando o atrito superficial de diferentes tipos de pavimentos. Também, estes ensaios reportam resultados diretos de atrito, descartando a necessidade da conversão dos parâmetros de micro e de macrotextura, tendo em vista as limitações do método do IFI. Por fim, mas também de relevância, o uso da tecnologia pouparia tempo na coleta de dados. Além disso, estes dados mais representativos da realidade poderiam possibilitar a validação dos resultados obtidos com o modelo do IFI para a realidade brasileira.

Quanto à representação do comportamento dos condutores nos simuladores, a análise da aceleração e da desaceleração e os impactos da chuva no comportamento dos condutores quanto a estes parâmetros podem contribuir com resultados ainda mais acurados e realísticos. Além de serem capazes de representar com maior acurácia os ajustes na presença da chuva, estes parâmetros podem eliminar a heterogeneidade advinda do aumento dos parâmetros *bx\_add* e *bx\_mult*, que representaram bem a redução do FS, mas acarretaram na maior frequência de conflitos menos severos. Além disso, propõem-se a avaliação de outros parâmetros e modelos comportamentais dos simuladores, como o modelo de *lane changing* do VISSIM, no intuito de representar adequadamente todas as interações veiculares.

A inclusão de outros modos de deslocamento que fazem parte da matriz de transportes em ambientes urbanos também contribuem para a obtenção de modelos de simulação mais fidedignos ao observado em campo. Esta consideração pode trazer impactos tanto na segurança viária quanto no desempenho operacional do tráfego. Aliado ao entendimento dos demais modelos e parâmetros do simulador, o comportamento das motocicletas de circular entre as faixas de tráfego poderá ser incluído nas análises, evidenciando problemas não identificados devido às limitações. Outros elementos tipicamente urbanos, como acessos à estabelecimentos, saídas residenciais e estacionamentos em recuos das vias arteriais, os quais fugiram deste escopo, também podem contribuir largamente para uma representação mais precisa da realidade.

Por fim, em cenários mais representativos, os esforços de análise de todos os tipos de conflito através dos indicadores *proxy* aqui abordado se tornam mais significantes. A implementação de outros modelos comportamentais, de outros modos de transporte e de outras interações veiculares na análise requerem, entretanto, a inclusão de modelos de frenagem e da consideração do movimento lateral (frenagem longitudinal e lateral).

## REFERÊNCIAS

AGARWAL, M.; MAZE, T. H.; SOULEYRETTE, R. **The Weather and Its Impacts on Urban Freeway Traffic Operations**. *Transportation Research Board (TRB) 85th Annual Meeting Compendium of Papers*. Washington, D.C., United States of America, 2006.

ALI, G. A.; AL-MAHROOQI, R.; AL-MAMMARI, M.; AL-HINAI, N.; TAHA, R. **Measurement, Analysis, Evaluation, and Restoration of Skid Resistance on Streets of Muscat**. *Transportation Research Record*, n. 1655, p. 200-210. 1999.

AMINI, B.; BEIGI, H. H. A. **Modeling the Effect of Road Surface Friction on the Accident Rate of Urban Un-Signalized Intersections**. *Transportation Research Board (TRB) 94th Annual Meeting Compendium of Papers*. Washington, D.C., United States of America, 2015.

AMUNDSEN, F.; HYDÉN, C. **Proceedings: First Workshop on Traffic Conflicts**. Institute of Transport Economics. Oslo, Norway, 1977.

ANDRESEN, A.; WAMBOLD, J. C. **Friction Fundamentals, Concepts and Methodology**. TP 13837E, Transportation Development Centre (TDC). Montreal, Canada, 1999.

APS, M. **Classificação da Aderência Pneu-Pavimento pelo Índice Combinado IFI – International Friction Index para Revestimentos Asfálticos**. Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (Poli-USP), São Paulo, SP, 2006.

ARAUJO, V. M. C.; BESSA, I. S.; CASTELO BRANCO, V. T. F. **Measuring Skid Resistance of Hot Mix Asphalt using the Aggregate Image Measurement System (AIMS)**. *Construction and Building Materials*, n. 98, p. 476-481. 2015.

ASAMER, J.; VAN ZUYLEN, H. J. **Saturation Flow under Adverse Weather Conditions**. *Transportation Research Record*, n. 2258, p. 103-109. 2011.

ASAMER, J.; VAN ZUYLEN, H. J.; HEILMANN, B. **Calibrating Car-Following Parameters for Snowy Road Conditions in the Microscopic Traffic Simulator VISSIM**.

*The Institution of Engineering and Technology (IET) Intelligent Transportation Systems*, v. 7, p. 114-121. 2013.

ASI, I. M. **Evaluating Skid Resistance of Different Asphalt Concrete Mixes**. *Building and Environment*, n. 42, p. 325-329. 2007.

ASTM – American Society for Testing and Materials. **ASTM E867-06: Standard Terminology Relating to Vehicle-Pavement Systems**. Pennsylvania, United States of America, 2012.

ASTM – American Society for Testing and Materials. **ASTM E303-93: Standard Test Method for Measuring Surface Frictional Properties Using the British Pendulum Tester**. Pennsylvania, United States of America, 2013.

ASTM – American Society for Testing and Materials. **ASTM E1960-07: Standard Practice for Calculating International Friction Index of a Pavement Surface**. Pennsylvania, United States of America, 2015.

ASTM – American Society for Testing and Materials. **ASTM E965: Standard Test Method for Measuring Pavement Macrotexture Depth Using a Volumetric Technique**. Pennsylvania, United States of America, 2015.

BARCELÓ, J.; DUMONT, A.; MONTERO, L.; PERARNAU, J.; TORDAY, A. **Safety Indicators for Microsimulation-Based Assessments**. *Proceedings of the 82nd Annual Meeting of the Transportation Research Board (TRB)*. Washington D. C., United States of America, 2003.

BILLOT, R.; EL-FAOUZI, N. E.; DE VUYST, F. **Multilevel Assessment of the Impact of Rain on Drivers' Behavior – Standardized Methodology and Empirical Analysis**. *Transportation Research Record*, n. 2107, p. 134-142. 2009.

BRAGA, C. K. V. **Qualidade da Classificação Veicular por Laços Indutivos do Sistema de Fiscalização Eletrônica de Fortaleza**. Projeto de Graduação, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 2016.

CALIENDO, C.; GUIDA, M.; PARISI, A. **A Crash-Prediction Model for Multilane Roads.** *Accident Analysis and Prevention*, n. 39, p. 657-670. 2007.

CANALE, A. C. **Automobilística: Dinâmica, Desempenho.** São Paulo, SP: Livros Érica, 1989.

CHANG, L. Y.; CHEN, W. C. **Data Mining of Tree-Based Models to Analyze Freeway Accident Frequency.** *Journal of Safety Research*, v. 36, n. 4, p. 365-375. 2005.

CHIN, H. C.; QUEK, S. T. **Measurement of Traffic Conflicts.** *Safety Science*, v. 26, n. 3, p. 169-185. 1997.

CHOWDHURY, A.; KASSEM, E.; ALDAGARI, S.; MASAD, E. **Validation of Asphalt Mixture Pavement Skid Prediction Model and Development of Skid Prediction Model for Surface Treatments.** Technical Report No. FHWA/TX-17/0-6746-01-1, Texas A&M Transportation Institute. Texas, United States of America, 2017.

COLONY, D. C. **Influence of Traffic, Surface Age and Environment on Skid Number.** Final Report – Project Number 14460(0), Ohio Department of Transportation. Ohio, United States of America, 1992.

COOPER, D.; FERGUSON, N. **A Conflict Simulation Model.** *Traffic Engineering and Control*, v. 17, p. 306-309. 1976.

COOPER, P. J. **Experience with Traffic Conflicts in Canada with Emphasis on “Post Encroachment Time” Techniques.** *Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on International Calibration Study of Traffic Conflict Technique.* 1983.

COSTA, S. L.; CASTELO BRANCO, V. T. F.; FREITAS, E. F. **Avaliação da Aderência Pneu-Pavimento para Diferentes Tipo de Pavimentos Utilizando o International Friction Index (IFI).** *Anais do XXXI Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes (ANPET).* Recife, PE, 2017.

CUNTO, F. J. C. **Assessing Safety Performance of Transportation Systems Using Microscopic Simulation**. Doctoral Thesis, University of Waterloo, Waterloo, Canada, 2008.

CUNTO, F. J. C.; SACCOMANNO, F. **Calibration and Validation of Simulated Vehicle Safety Performance at Signalized Intersections**. *Accident Analysis and Prevention*, n. 40, p. 1171-1179. 2008.

DAN, H. C.; HE, L. H.; XU, B. **Experimental Investigation on Skid Resistance of Asphalt Pavement Under Various Slippery Conditions**. *International Journal of Pavement Engineering*, v. 18, n. 6, p. 1-15. 2017.

DENATRAN – Departamento Nacional de Trânsito. **Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito, Volume V – Sinalização Semafórica**. Brasília, DF, 2014.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Manual de Restauração de Pavimentos**, 2ª Edição. Rio de Janeiro, RJ: IPR Publicação 720, 2006.

DO, M. T.; CERESO, V.; ZAHOUANI, H. **Laboratory Test to Evaluate the Effect of Contaminants on Road Skid Resistance**. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, n. 228(11), p. 1276-1284. 2014.

EL-BASYOUNY, K.; SAYED, T. **Safety Performance Functions Using Traffic Conflicts**. *Safety Science*, n. 51, p. 160-164. 2013.

FARMER, C. M. **Reliability of Police-Reported Information for Determining Crash and Injury Severity**. *Traffic Injury Prevention*, n. 4, p. 38-44. 2003.

FERRAZ, A. C. P.; RAIA JÚNIOR, A. A.; BEZERRA, B. S.; BASTOS, J. T.; SILVA, K. C. R. **Segurança Viária**. São Carlos, SP: Suprema, 2012.

FERREIRA, W. L. G.; CASTELO BRANCO, V. T. F. **Proposição do Uso de Ferramentas de Georreferenciamento para Avaliação Subjetiva de Pavimentos Urbanos**. *45ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPv)*. Brasília, DF, 2016.

FUENTES, L. G.; GUNARATNE, M.; DE LEÓN IZEPPI, E.; FLINTSCH, G. W.; MARTINEZ, G. **Determination of Pavement Macrotexture Limit for Use in International Friction Index Model.** *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, n. 2306, p. 138-143. 2012.

FRIDSTROM, L.; IFVER, J.; INGEBRIGTSEN, S.; KULMALA, R.; THOMSEN, L. K. **Measuring the Contribution of Randomness, Exposure, Weather and Daylight to the Variation in Road Accidents.** *Accident Analysis and Prevention*, n. 27, p. 1-20. 1995.

FWA, T. F.; ONG, G. P. **Wet-Pavement Hydroplaning Risk and Skid Resistance: Analysis.** *Journal of Transportation Engineering*, v. 134, n. 5, p. 182-190. 2008.

GANDHI, P. M.; COLUCCI, B.; GANDHI, S. P. **Polishing Aggregates and Wet-Weather Accident Rates for Flexible Pavements.** *Transportation Research Record*, n. 1300, p. 71-79. 1991.

GETTMAN, D.; HEAD, L. **Surrogate Safety Measures from Traffic Simulation Models.** Federal Highway Administration Final Report No. FHWA-RD-03-050. Virginia, United States of America, 2003.

HABTEMICHAEL, F. G.; PICARDO-SANTOS, L. **Sensitivity Analysis of VISSIM Driver Behavior Parameters on Safety of Simulated Vehicles and their Interaction with Operations of Simulated Traffic.** *Transportation Research Board (TRB) 92nd Annual Meeting Compendium of Papers*. Washington, D.C., United States of America, 2012.

HALL, J. W.; SMITH, K. L.; TITUS-GLOVER, L.; EVANS, L. D.; WAMBOLD, J. C.; YAGER, T. J.; RADO, Z. **Guide for Pavement Friction.** Final Report, Project No. 01-43, National Cooperative Highway Research Program (NCHRP). Transportation Research Board (TRB) of National Academies, Washington D. C., United States of America, 2009.

HAUER, E.; HAKKERT, A. S. **The Extent and Implications of Incomplete Accident Reporting.** *Transportation Research Record*, n. 1185, p. 1-10. 1989.

HAYWARD, J. C. **Near-miss Determination through Use of Scale of Danger**. Report No. TTSC-7115, Pennsylvania Transportation and Traffic Safety Center, The Pennsylvania State University. Pennsylvania, United States of America, 1972.

HENRY, J. J. **Evaluation of Pavement Friction Characteristics – A Synthesis of Highway Practice**. NCHRP Synthesis 291, National Cooperative Highway Research Program, Washington D. C., United States of America, 2000.

HOU, T.; MAHMASSANI, H. S.; ALFELOR, R. M.; KIM, J.; SABERI, M. **Calibration of Traffic Flow Models under Adverse Weather and Application in Mesoscopic Network Simulation**. *Transportation Research Record*, n. 2391, p. 92-104. 2013.

HUANG, F.; LIU, P.; YU, H.; WANG, W. **Identifying if VISSIM Simulation Model and SSAM Provide Reasonable Estimates for Field Measured Traffic Conflicts at Signalized Intersections**. *Accident Analysis and Prevention*, n. 50, p. 1014-1024. 2013.

HUGUENIN, F.; TORDAY, A.; DUMONT, A. G. **Evaluation of Traffic Safety Using Microsimulation**. *5th Swiss Transport Research Conference (STRC)*, Ascona, Switzerland, 2005.

HYDÉN, C. **The Development of a Method for Traffic Safety Evaluation: The Swedish Traffic Conflicts Technique**. Bulletin 70, Department of Traffic Planning and Engineering, Lund University. Lund, Sweden, 1987.

HYDÉN, C. **Traffic Safety Work with Video-Processing**. Technical Report, Transportation Department, University Kaiserslautern, Kaiserslautern, Germany, 1996.

IVEY, D. L.; GRIFFIN, L. I.; NEWTON, T. M.; LYTTON, R. **Predicting Wet Weather Accidents**. *Accident Analysis and Prevention*, n. 13, p. 83-91. 1981.

JONKERS, R.; KLUNDER, G.; VAN DER HORST, R.; DE ROOY, R. **Development of an Algorithm for Using Weather-Dependent Dynamic Speed Limits to Enhance Safety**. *Proceedings of the 15th World Congress on ITS*, p. 2100-2109. 2008.



KATZ, B.; O'DONNELL, C.; DONOUGHE, K.; ATKINSON, J.; FINLEY, M.; BALKE, K.; KUHN, B.; WARREN, D. **Guidelines for the Use of Variable Speed Limit System in Wet Weather**. Federal Highway Administration (FHWA), Report No. FHWA-SA-12-022. Washington, D.C., United States of America, 2012.

KHAVAS, R. G.; HELLINGA, B.; MASOULEH, A. Z. **Identifying Parameters for Microsimulation Modeling of Traffic in Inclement Weather**. *Transportation Research Record*, n. 2613, p. 52-60. 2017.

KOGBARA, R. B.; MASAD, E. A.; KASSEM, E.; SCARPAS, A.; ANUPAM, K. **A State-of-the-Art Review of Parameters Influencing Measurement and Modeling of Skid Resistance of Asphalt Pavements**. *Construction and Building Materials*, n. 114, p. 602-617. 2016.

KOKKALIS, A. G.; PANAGOULI, O. K. **Fractal Evaluation of Pavement Skid Resistance Variations – I: Surface Wetting**. *Chaos, Solitons & Fractals*, v. 9, n. 11, p. 1875-1890. 1998.

KUTTESCH, J. S. **Quantifying the Relationship between Skid Resistance and Wet Weather Accidents for Virginia Data**. Masters Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University. Virginia, United States of America, 2004.

LACERDA, V. M. **Estimação da Velocidade Média em Vias Urbanas com o Uso do Microssimulador VISSIM**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, CE, 2016.

LI, Y.; LIU, C.; DING, L. **Impact of Pavement Conditions on Crash Severity**. *Accident Analysis and Prevention*, v. 59, p. 399-406. 2013.

LINDENMANN, H. P. **New Findings Regarding the Significance of Pavement Skid Resistance for Road Safety on Swiss Freeways**. *Journal of Safety Research*, n. 27, p. 395-400. 2006.

LOWNES, N.; MACHEMEHL, R. **Sensitivity of Simulation Capacity to Modification of VISSIM Driver Behavior Parameters.** *Transportation Research Record*, n. 1988, p. 102-110. 2006.

MAYORA, J. M. P.; PIÑA, R. J. **An Assessment of the Skid Resistance Effect on Traffic Safety Under Wet-Pavement Conditions.** *Accident Analysis and Prevention*, n. 41, p. 881-886. Amsterdam, Netherlands, 2009.

NAJAFI, S.; FLINTSCH, G. W.; MEDINA, A. **Linking Roadway Crashes and Tire-Pavement Friction: A Case Study.** *International Journal of Pavement Engineering*, p. 1-9. 2015.

NOYCE, D. A.; BAHIA, H. U.; YAMBÓ, J. M.; KIM, G. **Incorporating Road Safety Into Pavement Management: Maximizing Asphalt Pavement Surface Friction for Road Safety Improvements – Draft Literature Review and State Surveys.** Midwest Regional University Transportation Center, Traffic Operations and Safety (TOPS) Laboratory. Wisconsin, United States of America, 2005.

OMS – Organização Mundial da Saúde. **World Report on Road Traffic Injury Prevention**, 2004.

OMS – Organização Mundial da Saúde. **Global Status Report on Road Safety: Supporting a Decade of Action**, 2013.

ONSV – Observatório Nacional de Segurança Viária. **Retrato Segurança Viária no Brasil**, 2014.

PEREIRA, C. A. **Análise da Aderência Pneu-Pavimento em Rodovias do Estado de Pernambuco e da Paraíba com Elevado Índice de Acidentes.** Tese de Doutorado, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, 2010.

PERKINS, S. R.; HARRIS, J. I. **Traffic Conflict Characteristics – Accident Potential at Intersections.** *Highway Research Record*, n. 225, p. 35-43. Washington D.C., United States of America, 1968.

PIARC – Permanent International Association of Road Congresses. **Optimization of Surface Characteristics**. Report to the 28th World Road Congress. Brussels, Belgium, 1987.

PTV – Planung Transport Verkehr. **VISSIM 6.0: Manual do Usuário**. Karlsruhe, Germany, 2014.

PU, L.; JOSHI, R. **Surrogate Safety Assessment Model (SSAM): Software User Manual**. Federal Highway Administration Report No. FHWA-HRT-08-050. Virginia, United States of America, 2008.

RAKHA, H.; FARZANEH, M.; ARAFEH, M.; STERZIN, E. **Inclement Weather Impacts on Freeway Traffic Stream Behavior**. *Transportation Research Record*, n. 2071, p. 8-18. 2008.

RAKHA, H.; KRECHMER, D.; CORDAHI, G.; ZOHDY, I.; SADEK, S.; ARAFEH, M. **Microscopic Analysis of Traffic Flow in Inclement Weather**. Report No. FHWA-JPO-09-066, Federal Highway Administration. Virginia, United States of America, 2009.

RIZENBERGS, R. L.; BURCHETT, J. L.; NAPIER, C. T.; DEACON, J. A. **Accidents on Rural Interstate and Parkway Roads and their Relation to Pavement Friction**. *Transportation Research Record*, n. 584, p. 22-36. 1976.

SCOTT, P. P. **Modelling Time-Series of British Road Accident Data**. *Accident Analysis and Prevention*, n. 18, p. 109-117. 1986.

SENGOZ, B.; TOPAL, A.; TANYEL, S. **Comparison of Pavement Surface Texture Determination by Sand Patch Test and 3D Laser Scanning**. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, n. 561, p. 73-78. 2012.

SO, J.; HOFFMAN, S.; LEE, J.; BUSCH, F.; CHOI, K. **A Prediction Accuracy-Practicality Tradeoff Analysis of the State-of-the-Art Safety Performance Assessment Methods**. *Transportation Research Procedia*, n. 15, p. 794-805. 2016.

TRB – Transportation Research Board. **Highway Capacity Manual**. National Research Council, Washington D. C., United States of America, 2010.

VAN DER HORST, A. R. A. **A Time-Based Analysis of Road User Behaviour in Normal and Critical Encounters**. Doctoral Thesis, Delft University of Technology. Delft, Netherlands, 1990.

VEITH, A. G. **Tires – Roads – Rainfall – Vehicles: The Traction Connection**. *Frictional Interaction of Tire and Pavement, ASTM STP 793*, p. 3-40. 1983.

WAMBOLD, J. C.; HENRY, J. J.; HEGMON, R. R. **Skid Resistance of Wet-Weather Accident Sites**. STP929, American Society for Testing and Materials (ASTM). Pennsylvania, United States of America., 1986.

WAMBOLD, J. C.; ANTLE, C. E.; HENRY, J. J.; RADO, Z. **International PIARC Experiment to Compare and Harmonize Texture and Skid Resistance Measurements**. PIARC World Road Association. Paris, France, 1995.

WILSON, D. J. **The Effect of Rainfall and Contaminants on Road Pavement Skid Resistance**. Report 515, New Zealand Transport Agency. Wellington, New Zealand, 2013.

YOUNG, W.; SOBHANI, A.; LENNÉ, M. G.; SARVI, M. **Simulation of Safety: A Review of the State of the Art in Road Safety Simulation Modelling**. *Accident Analysis and Prevention*, n. 66, p. 89-103. 2014.

ZHANG, L.; COLYAR, J.; PISANO, P.; HOLM, P. **Identifying and Assessing Key Weather-Related Parameters and their Impacts on Traffic Operations using Simulation**. *Transportation Research Board (TRB) 84th Annual Meeting Compendium of Papers*. Washington, D.C., United States of America, 2005.

**APÊNDICE A – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE PÊNDULO BRITÂNICO E MANCHA DE AREIA DO TRECHO ESTUDADO**

Ponto	Distância (m)	Trilha-de-Roda		Condição	HS (mm)				BPN <sub>SECO</sub>					BPN <sub>MOLHADO</sub>				
		Externa	Interna		1	2	3	4	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
1	0	X		RECAPE	32	31	30	32	85	88	90	90	90	55	54	54	53	51
2	0		X	RECAPE	41	38	39	40	100	97	98	95	96	60	60	59	59	59
3	20	X		RECAPE	27	25	26	23	84	85	86	90	90	62	56	60	60	60
4	20		X	RECAPE	30	29	32	28	96	95	95	94	97	55	54	51	51	54
5	40	X		RECAPE	36	35	35	35	95	87	90	97	90	55	59	55	57	59
6	40		X	RECAPE	36	37	37	38	91	91	90	90	92	56	59	55	55	55
7	60	X		RECAPE	26	25	26	23	114	107	114	105	110	76	66	75	77	80
8	60		X	RECAPE	26	27	26	27	90	94	95	95	94	55	54	55	54	55
9	80	X		RECAPE	39	36	39	38	83	86	90	91	94	56	55	55	55	55
10	80		X	RECAPE	36	33	35	36	96	98	99	96	96	58	57	56	55	56
11	100	X		RECAPE	28	28	28	28	95	100	98	100	101	65	61	60	60	60
12	100		X	RECAPE	30	32	30	30	96	93	99	100	97	65	63	62	63	62
13	140	X		RECAPE	38	36	35	36	91	95	96	95	98	60	60	60	60	60
14	140		X	RECAPE	35	34	34	35	100	100	100	100	104	60	64	66	66	66
15	180	X		RECAPE	31	30	33	30	97	95	100	99	100	65	62	65	60	61
16	180		X	RECAPE	39	39	37	38	83	83	81	82	79	40	40	40	41	42
17	200	X		RECAPE	37	38	40	40	95	84	95	102	95	55	55	55	55	55
18	200		X	RECAPE	32	35	33	34	95	94	95	95	95	62	60	60	61	60
19	220	X		RECAPE	37	36	35	36	75	84	85	86	89	55	55	54	54	54
20	220		X	RECAPE	37	40	41	40	104	104	103	104	102	60	59	59	59	56
21	260	X		RECAPE	37	40	41	42	83	80	86	88	89	53	50	51	50	50
22	260		X	RECAPE	37	35	34	34	87	90	87	90	89	54	54	55	54	55
23	380	X		RECAPE	40	41	39	42	82	87	89	89	86	47	47	48	48	48

24	380		X	RECAPE	46	41	44	44	87	92	93	92	94	54	54	52	51	51
25	400	X		RECAPE	45	44	44	47	110	107	110	105	101	56	51	41	40	51
26	400		X	RECAPE	40	41	43	40	81	83	84	85	80	41	44	44	44	45
27	420	X		RECAPE	39	38	36	36	86	94	99	96	100	51	50	50	50	50
28	420		X	RECAPE	40	33	36	35	95	94	96	96	95	55	52	50	51	50
29	430	X		DESGASTE	15	16	16	15	90	95	90	86	94	75	76	75	75	75
30	430		X	DESGASTE	18	18	17	15	125	125	131	135	137	89	81	84	84	85
31	435	X		DESGASTE	18	16	16	16	79	77	86	91	94	70	75	70	74	74
32	435		X	DESGASTE	18	20	18	18	77	79	86	87	87	58	59	58	56	54
33	440	X		RECAPE	30	33	30	31	85	87	88	90	89	51	47	50	50	50
34	440		X	RECAPE	38	35	36	38	77	87	89	88	89	50	51	50	50	50
35	460	X		DESGASTE	18	19	16	18	92	94	93	91	90	55	55	55	54	54
36	460		X	DESGASTE	19	20	17	19	71	80	86	84	89	56	51	56	55	55
37	470	X		DESGASTE	20	20	19	19	96	94	95	92	93	58	57	57	54	53
38	470		X	DESGASTE	18	17	17	15	86	76	80	80	87	54	52	51	55	55
39	475	X		DESGASTE	17	16	16	16	60	85	93	90	85	54	53	54	50	48
40	475		X	DESGASTE	17	19	17	18	100	105	101	99	100	60	55	60	54	59
41	490	X		RECAPE	34	33	31	33	70	75	81	90	96	65	65	65	65	65
42	490		X	RECAPE	40	36	37	37	75	84	90	96	100	66	65	64	63	63
43	495	X		DESGASTE	19	20	19	20	76	71	80	89	92	57	55	54	57	52
44	495		X	DESGASTE	16	18	17	17	60	64	72	80	80	64	63	61	64	66
45	500	X		DESGASTE	20	19	20	18	65	63	66	67	71	65	66	66	62	61
46	500		X	DESGASTE	19	18	19	19	70	76	87	90	91	71	72	70	70	70
47	505	X		DESGASTE	22	16	21	19	60	60	62	64	70	57	61	57	51	54
48	505		X	DESGASTE	23	22	23	22	75	96	96	97	99	58	60	60	63	61
49	525	X		RECAPE	38	36	36	37	84	88	86	89	87	50	50	49	49	49
50	525		X	RECAPE	33	35	35	32	96	96	95	95	95	56	56	57	55	55
51	539	X		DESGASTE	16	15	15	16	80	84	90	100	101	56	55	56	54	54

52	539		X	DESGASTE	16	17	14	17	101	109	105	105	105	70	70	70	69	66
53	545	X		RECAPE	44	45	44	44	72	71	73	70	66	34	33	34	32	31
54	545		X	RECAPE	37	36	38	38	61	62	58	59	59	34	35	40	32	33
55	557	X		DESGASTE	17	18	18	18	55	55	58	58	59	55	55	50	50	52
56	557		X	DESGASTE	18	15	16	16	82	77	78	75	76	47	45	47	46	43
57	563	X		RECAPE	39	37	40	39	110	114	110	111	115	60	61	60	61	61
58	563		X	RECAPE	34	35	34	37	81	89	90	95	95	62	59	59	59	60
59	569	X		DESGASTE	17	16	18	18	76	80	80	80	79	50	46	47	45	45
60	569		X	DESGASTE	19	16	18	17	65	69	70	67	65	38	36	35	35	35
61	575	X		RECAPE	35	35	36	35	100	103	105	102	102	55	55	55	55	55
62	575		X	RECAPE	34	35	35	34	95	99	103	105	104	59	57	56	54	55
63	595	X		RECAPE	45	43	42	46	75	82	85	86	88	47	45	45	45	45
64	595		X	RECAPE	45	42	42	45	91	100	105	105	107	64	62	61	61	60
65	650	X		RECAPE	37	36	38	37	102	110	104	105	109	61	60	60	60	59
66	650		X	RECAPE	36	35	35	34	86	86	87	94	96	55	54	54	54	55
67	670	X		RECAPE	41	38	36	38	96	99	101	104	104	64	64	65	65	64
68	670		X	RECAPE	34	34	34	35	91	94	96	92	98	58	57	57	56	56
69	690	X		RECAPE	33	33	31	33	96	96	95	96	94	60	60	57	58	57
70	690		X	RECAPE	36	37	38	37	83	102	100	100	101	61	64	61	61	60
71	695	X		DESGASTE	16	16	16	15	106	110	109	109	99	74	75	75	70	80
72	695		X	DESGASTE	16	16	16	15	99	109	105	101	104	70	69	66	65	64
73	715	X		RECAPE	32	32	34	31	71	82	83	86	86	47	46	44	45	45
74	715		X	RECAPE	35	37	38	38	62	65	70	75	78	48	44	45	43	44
75	730	X		RECAPE	39	38	40	39	96	100	89	91	95	44	40	30	30	35
76	730		X	RECAPE	38	38	39	37	90	89	89	86	89	45	45	44	46	45
77	740	X		RECAPE	36	36	35	36	70	85	85	82	83	42	51	40	41	40
78	740		X	RECAPE	37	36	37	36	94	90	90	94	90	50	50	49	49	50
79	790	X		RECAPE	38	40	38	40	91	89	87	90	90	54	54	54	55	54

80	790		X	RECAPE	39	40	41	39	90	92	95	95	101	58	58	60	60	58
81	845	X		RECAPE	33	33	34	34	81	74	77	78	76	44	42	42	40	42
82	845		X	RECAPE	30	32	33	33	90	95	81	85	87	54	53	53	52	55
83	860	X		RECAPE	27	26	27	27	95	95	95	96	98	55	55	55	54	54
84	860		X	RECAPE	30	32	31	31	84	80	85	81	84	50	49	48	46	48
85	985	X		DESGASTE	16	16	16	17	99	95	99	95	98	54	53	50	51	50
86	985		X	DESGASTE	15	15	15	14	63	63	64	65	67	64	60	60	60	62
87	990	X		DESGASTE	15	14	15	13	50	56	55	56	58	53	52	53	51	52
88	990		X	DESGASTE	14	17	15	14	78	94	100	102	105	72	67	67	71	71
89	995	X		DESGASTE	15	14	16	14	76	83	86	90	90	51	48	46	45	45
90	995		X	DESGASTE	13	15	15	15	90	84	85	88	89	56	55	54	55	55
91	1000	X		DESGASTE	15	16	14	17	60	61	65	75	75	61	58	59	57	58
92	1000		X	DESGASTE	13	17	16	16	92	100	100	100	99	65	65	64	56	59
93	1005	X		DESGASTE	14	15	16	15	107	107	113	112	115	85	83	84	83	83
94	1005		X	DESGASTE	14	13	13	13	75	77	81	89	106	71	70	69	71	70
95	1010	X		DESGASTE	16	16	15	14	72	71	70	80	81	65	64	57	58	60
96	1010		X	DESGASTE	14	14	13	13	86	89	93	93	99	70	65	63	59	61
97	1065	X		DESGASTE	17	16	15	16	95	100	96	100	100	61	59	59	60	61
98	1065		X	DESGASTE	15	15	14	15	70	72	75	74	80	68	69	68	69	66
99	1070	X		DESGASTE	18	16	15	15	74	84	82	92	95	61	58	56	59	60
100	1070		X	DESGASTE	16	15	16	16	91	101	105	106	110	82	76	77	79	76
101	1075	X		DESGASTE	14	13	14	14	100	103	101	105	101	55	55	55	55	54
102	1075		X	DESGASTE	16	17	17	16	84	84	85	84	87	50	50	50	50	48
103	1080	X		DESGASTE	15	15	15	15	87	95	95	95	95	64	60	60	56	60
104	1080		X	DESGASTE	17	19	19	17	77	85	85	89	94	67	64	65	60	62
105	1085	X		DESGASTE	15	15	14	15	83	89	99	106	105	74	66	66	65	63
106	1085		X	DESGASTE	17	15	15	15	94	101	97	91	96	66	70	66	68	70
107	1090	X		DESGASTE	15	16	17	15	105	103	101	101	100	64	54	54	52	61



108	1090		X	DESGASTE	18	16	16	16	106	105	109	107	105	64	64	61	58	62
109	1095	X		DESGASTE	15	15	15	15	90	92	95	92	94	55	55	54	51	51
110	1095		X	DESGASTE	15	17	16	16	101	99	105	99	96	69	65	65	66	69
111	1100	X		DESGASTE	15	14	14	14	86	89	95	99	105	75	69	66	66	67
112	1100		X	DESGASTE	15	16	15	14	81	93	95	104	105	71	66	65	66	65
113	1105	X		DESGASTE	16	14	14	16	93	98	94	91	95	59	56	55	55	54
114	1105		X	DESGASTE	16	15	15	16	91	93	90	90	90	60	56	56	57	59
115	1110	X		DESGASTE	16	16	15	17	86	88	92	100	99	59	56	56	55	54
116	1110		X	DESGASTE	18	16	18	15	81	82	82	83	85	51	50	50	49	50
117	1115	X		DESGASTE	15	15	14	15	96	97	100	101	101	65	63	62	65	66
118	1115		X	DESGASTE	16	15	14	14	94	101	99	101	102	65	66	65	67	66
119	1120	X		DESGASTE	15	16	16	14	90	90	93	94	88	56	54	54	53	52
120	1120		X	DESGASTE	16	16	15	16	90	93	92	93	91	55	54	51	50	51