

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**DETECÇÃO DE CONFLITOS DE TRÁFEGO USANDO VISÃO
COMPUTACIONAL BASEADA NO RASTREAMENTO DE
VEÍCULOS**

CAROLINA NOLETO PERNA

ORIENTADORA: MICHELLE ANDRADE
CO-ORIENTADOR: GABRIEL ANDRADE LANZARO

PROJETO FINAL EM ENGENHARIA CIVIL

BRASÍLIA/DF: NOVEMBRO/2021

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**DETECÇÃO DE CONFLITOS DE TRÁFEGO USANDO VISÃO
COMPUTACIONAL BASEADA EM RASTREAMENTO DE VEÍCULOS**

CAROLINA NOLETO PERNA

**TRABALHO DE PROJETO FINAL SUBMETIDO AO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO
PARTE DOS REQUISITOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM
ENGENHARIA CIVIL.**

APROVADO POR:

**MICHELLE ANDRADE, Dra (UnB – Universidade de Brasília)
ORIENTADORA**

**GABRIEL ANDRADE LANZARO, MSc (UBC – University of British Columbia)
CO-ORIENTADOR**

**PASTOR WILLY GONZALES TACO, Dr (UnB – Universidade de Brasília)
EXAMINADOR INTERNO**

**SUZANA DURAN BERNARDES, MSc (NYU – New York University)
EXAMINADOR EXTERNO**

BRASÍLIA/DF, 11 de NOVEMBRO de 2021.

FICHA CATALOGRÁFICA

PERNA, CAROLINA NOLETO

Detecção de Conflitos de Tráfego Usando Visão Computacional Baseada em Rastreamento de Veículos. Distrito Federal, 2021.

xi, 56p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Civil, 2021).

Trabalho de Projeto Final – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Segurança viária

2. Técnica de análise de conflitos

3. Rastreamento de veículos

4. Dados de vídeo

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

PERNA, C. N. (2021). Detecção de Conflitos de Tráfego Usando Visão Computacional Baseada em Rastreamento de Veículos. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, DF, 56p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Carolina Noleto Perna

TÍTULO DO TRABALHO DE PROJETO FINAL: Detecção de Conflitos de Tráfego Usando Visão Computacional Baseada em Rastreamento de Veículos.

GRAU/ANO: Bacharel em Engenharia Civil / 2021.

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Carolina Noleto Perna
SQS 211 Bloco G Apto. 606
CEP: 70274-070 – Brasília/DF – Brasil.

AGRADECIMENTOS

Aos meu pais, Valéria e Edvaldo e minhas irmãs, Luísa e Beatriz, por todo o suporte e apoio irrestritos durante toda a minha caminhada educacional e principalmente durante esses cinco anos de graduação. Agradeço por sempre estarem por perto e serem peça fundamental para essa conquista.

Aos meus avós, tios e primos, que sempre me incentivaram a seguir o que me fizesse mais feliz e vibraram com cada uma das minhas vitórias.

Aos meus amigos, em especial ao meu time de Handebol da UnB, que sempre estiveram por perto e com certeza fizeram com que os momentos difíceis passassem de forma mais leve.

Aos professores do curso de Engenharia Civil da UnB que tanto me ensinaram durante essa graduação, principalmente os que lecionaram matérias sobre Transportes e me fizeram gostar tanto da área.

Ao meu co-orientador, Gabriel, por todas as ajudas, comentários pertinentes e todo enorme conhecimento que me foi passado durante esse ano de elaboração de projeto final, mesmo estando em outro fuso horário.

À minha orientadora, professora Michelle, agradeço de forma especial, por todos os aprendizados, incentivos, conversas e pela incrível disponibilidade que sempre teve para me ajudar. Uma pessoa incrível que eu tive o prazer de ter como professora e orientadora.

Por fim, à todos que contribuíram de alguma forma para a minha graduação e para meu crescimento pessoal durante esses cinco anos, muito obrigada!

RESUMO

DETECÇÃO DE CONFLITOS DE TRÁFEGO USANDO VISÃO COMPUTACIONAL BASEADA EM RASTREAMENTO DE VEÍCULOS

A segurança viária é parte imprescindível de um sistema viário eficiente. Entretanto, diversos países, entre eles o Brasil, sofrem com a ocorrência de inúmeros sinistros de trânsito que geram sérias consequências sociais e econômicas. Atualmente, as iniciativas para melhoria da segurança do trânsito são baseadas em abordagens tradicionais reativas que apresentam limitações significativas e possuem como principal representante a utilização de dados históricos dos sinistros de trânsito.

Na tentativa de suprir as lacunas deixadas pelas abordagens tradicionais, diversas medidas de segurança complementares foram desenvolvidas, entre elas, a de maior destaque é a Técnica de Análise de Conflitos. Essa técnica é baseada na detecção dos conflitos e na relação desses com os sinistros de trânsito. Embora esteja ganhando bastante espaço, sua aplicação é ainda limitada devido a divergências referentes aos seus parâmetros.

Dessa forma, esse trabalho tem o intuito de analisar uma hora de vídeo de uma interseção da cidade de Taguatinga, Distrito Federal, por meio do software *Data From Sky* (2021), que consegue rastrear os veículos com grande eficiência. A partir dos dados obtidos pelo programa, calcula-se o indicador *Time To Collision* (TTC), para o caso mais geral do movimento bidimensional, para detecção dos conflitos existentes na interseção e posterior análise dos resultados no contexto da segurança viária.

Palavras-chave: segurança viária, técnica de análise de conflitos, rastreamento de veículos, dados de vídeo.

ABSTRACT

DETECTION OF TRAFFIC CONFLICTS USING COMPUTER VISION TECHNIQUE BASED ON VEHICLE TRACKING

Road safety is an essential part of an efficient road system. However, several countries, including Brazil, suffer from the occurrence of numerous crashes that cause serious social and economic consequences. Currently, actions to improve traffic safety are based on traditional and reactive approaches that have significant limitations, including the major shortcoming of utilizing of historical crash data.

To fill the gaps left by these traditional approaches, some surrogate safety measures have been developed. The most prominent is the Traffic Conflict Technique. This technique is based on the detection of conflicts and on their relationship to crashes. Although there is a growing interest in utilizing this technique, its application is still limited due to divergences regarding various parameters.

Thus, this work aims to analyze an 1-hour video from an intersection in the city of Taguatinga, Distrito Federal, using the software Data From Sky (2021), which can track vehicles with great efficiency. From the data obtained by the program, the Time To Collision (TTC) conflict indicator, generalized to the case of two-dimensional movements, is calculated for detecting the conflicts at the intersection and subsequent analysis of the results in the context of road safety.

Key-words: road safety, traffic conflict technique, vehicle tracking, video data.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	1
1.1.	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	2
1.2.	HIPÓTESE	2
1.3.	OBJETIVOS	3
1.4.	JUSTIFICATIVA	3
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1.	SEGURANÇA VIÁRIA	4
2.2.	MEDIDAS DE SEGURANÇA COMPLEMENTARES	7
2.3.	TÉCNICA DE ANÁLISE DE CONFLITOS	8
2.3.1.	RELAÇÃO CONFLITO X SINISTRO	9
2.3.2.	ABORDAGENS DA TÉCNICA DE ANÁLISE DE CONFLITOS	13
a)	Ações evasivas	14
b)	Proximidade Temporal-Espacial	18
2.3.3.	MÉTODOS	22
a)	Observação em Nível de Usuário	23
b)	Observação em Nível de Localidade	24
c)	Microsimulação	28
2.4.	ANÁLISE COMPUTACIONAL DOS CONFLITOS DE TRÁFEGO	29
2.4.1.	RASTREAMENTO BASEADO EM CARACTERÍSTICAS	30
3.	DETERMINAÇÃO DOS CONFLITOS DE TRÁFEGO	34
3.1.	CARACTERIZAÇÃO DA INTERSEÇÃO E DOS DADOS	34
3.2.	TRAJETÓRIAS DOS VEÍCULOS	36
3.3.	CÁLCULO DO <i>TIME TO COLLISION</i> (TTC)	38
4.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	47
4.1.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	47
4.2.	CUMPRIMENTO DOS OBJETIVOS	49
4.3.	SUGESTÕES DE ESTUDOS FUTUROS	50
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Fluxograma sobre o estudo da técnica de análise de conflitos	9
Figura 2.2: Pirâmide de segurança de eventos de trânsito	10
Figura 2.3: Representação dos conflitos em termos de proximidade de colisão	11
Figura 2.4: Categorias de conflitos por ações evasivas: conflito com conversão à esquerda, conflito de desvio e conflito de cruzamento.....	15
Figura 2.5: Evolução dos indicadores de conflito de tráfego por proximidade temporal e proximidade espacial.....	21
Figura 2.6: Observador treinado analisando uma interseção	26
Figura 2.7: Sistema de detecção de conflitos	27
Figura 2.8: Etapas do rastreamento baseado em características	31
Figura 2.9: Fluxograma da Análise de Vídeo.....	32
Figura 3.1: Layout da interseção pelo campo de visão da câmera – 1/2.....	34
Figura 3.2: Representação da interseção pelo campo de visão da câmera – 2/2	35
Figura 3.3: Rastreamento das trajetórias pelo <i>Data From Sky</i>	36
Figura 3.4: Definição dos <i>gates</i> de entrada e saída.....	37
Figura 3.5: Exemplificação dos conflitos de colisão traseira observados.....	41
Figura 3.6: Perfis de velocidade dos veículos 6248 e 6254	42
Figura 3.7: Perfil do <i>Time To Collision</i> (TTC) correspondente ao conflito de colisão traseira	43
Figura 3.8: Exemplificação dos conflitos devido à curva à direita observados	44
Figura 3.9: Perfis de velocidade dos veículos 1336 e 1346	45
Figura 3.10: Perfil do <i>Time To Collision</i> (TTC) correspondente ao conflito devido à curva à direita.....	46

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1: Descrição de algumas Medidas de Segurança Complementares.....	7
Quadro 2.2: Tipos de Conflitos de Tráfego definidos por Perkins e Harris (1968)	14
Quadro 2.3: Indicadores de Conflito baseados em Ações Evasivas	17
Quadro 2.4: Indicadores de Conflito de Tráfego por Proximidade Temporal-Espacial	21

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Veículos rastreados em função do tipo para cada trecho	38
--	----

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

ASV	Auditoria de Segurança Viária
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CG	<i>Critical Gap</i>
CI	<i>Crash Index</i>
CIF.....	<i>Criticality Index Function</i>
DAS	Sistema de Aquisição de Dados de Bordo
DRAC	<i>Deceleration Rate to Avoid the Crash</i>
ET	<i>Encroachment Time</i>
GT	<i>Gap Time</i>
IAPET	<i>Initial Attempted Post Encroachment Time</i>
NBR	Norma Brasileira
PET	<i>Post Encroachment Time</i>
PICUD	<i>Potential Index for Collision with Urgent Deceleration</i>
PSD	<i>Proportion of Stopping Distance</i>
RDR	<i>Required Deceleration Rate</i>
SWF	<i>Shock-Wave Frequency</i>
TA	<i>Time to Accident</i>
TET	<i>Time Exposed Time-to-Collision</i>
TIT	<i>Time Integrated Time-to-Collision</i>
TTC	<i>Time to Collision</i>
GMS	<i>Grid-Based Motion Statistics</i>
EKF.....	<i>Extended Kalman Filter</i>

1. INTRODUÇÃO

A falta de um sistema viário que garanta a segurança necessária aos usuários é motivo de perdas significativas para qualquer país, tanto social, quanto economicamente. De acordo com a Organização Mundial da Saúde (2021), os sinistros de trânsito são responsáveis, anualmente, pela morte de aproximadamente 1,35 milhão de pessoas ao redor do mundo. Além disso, as lesões causadas pelo trânsito custam aos países, em média, 3% dos seus respectivos PIBs.

Por maior que seja a importância da realização de pesquisas e políticas no sentido de incentivar a segurança viária, quase todas as iniciativas tomadas atualmente estão confinadas a abordagens tradicionais, baseadas em dados históricos e no julgamento pessoal de especialistas. Essas abordagens apresentam limitações significativas e são consideradas medidas reativas, sendo muitas vezes criticadas do ponto de vista ético por requererem a observação de diversos sinistros antes de tentar prevêê-los.

Na tentativa de melhorar parâmetros referentes à segurança do tráfego, diversos pesquisadores têm estudado formas de obter uma melhor compressão dos fatores que afetam a ocorrência e a gravidade dos sinistros de trânsito, levando-os a desenvolver métodos alternativos para análise da segurança viária. Entre as chamadas medidas de segurança complementares, a Técnica de Análise de Conflitos tem ganhado destaque por conseguir fornecer uma compressão mais profunda sobre o mecanismo de falha e a cadeia de eventos que levam à ocorrência de uma colisão.

A Técnica de Análise de Conflitos apresenta algumas conceituações distintas que a levam a possuir abordagens e métodos também distintos. Entre as formas mais utilizadas, e provavelmente mais eficientes de se avaliar os conflitos de tráfego, tem-se as técnicas de detecção e rastreamento de objetos oriundas da visão computacional. Essa baseia-se na análise de vídeos por meio de algoritmos que rastreiam objetos em movimento.

Dessa forma, o trabalho aqui apresentado tem o intuito de utilizar tais abordagens da técnica de visão computacional para analisar uma interseção brasileira e definir, a partir das trajetórias dos veículos obtidas por meio do *software Data From Sky* e do indicador *Time To Collision* (TTC), possíveis conflitos de tráfego. Salienta-se que o *software* utiliza a técnica de rastreamento baseada em características dos veículos.

1.1. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

No que se refere à segurança viária, as técnicas atualmente utilizadas para planejar medidas de segurança são muito limitadas, subjetivas e demoram para fornecer resultados que podem ser de fato implementados para ampliar a segurança da via. Conhecidas como pertencentes a uma abordagem reativa, essas técnicas são baseadas na análise de dados de sinistros ocorridos e na observação das características das vias por especialistas.

Ao passo que a análise da segurança, principalmente em países em desenvolvimento como o Brasil, fica restrita a abordagens reativas, a quantidade de pessoas que perdem suas vidas ou sofrem sérias sequelas em decorrência de sinistros de trânsito continua a ser elevada. Dessa forma, tem-se a necessidade da implantação de medidas complementares de segurança que consigam obter resultados mais objetivos, efetivos e imediatos.

Nesse contexto, a Técnica de Análise de Conflitos é vista como uma das principais medidas de segurança complementares e tem sido amplamente utilizada e estudada por diversos pesquisadores. Entretanto, ainda existe uma discordância entre alguns parâmetros referentes à técnica quando aplicada de forma essencialmente subjetiva, como uma dificuldade de se determinar os conflitos de tráfego de forma mais clara. Procedimentos empregando visão computacional, por exemplo, têm sido empregados para tal fim.

Portanto, observa-se a necessidade de se empregar formas de identificação dos conflitos de tráfego de maneira objetiva e rápida, visando um trânsito mais seguro. Analisa-se, então, a utilização da visão computacional, por meio do rastreamento dos veículos por características, para tal fim.

1.2. HIPÓTESE

A utilização de um programa que analisa vídeos e rastreia os veículos pode auxiliar na implementação de uma técnica mais efetiva e objetiva para análise da segurança viária.

1.3. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo a utilização de um programa computacional que analisa vídeos de interseções rodoviárias para determinar as trajetórias e alguns parâmetros de segurança no tráfego dos usuários da via. Essas trajetórias são obtidas por meio de uma abordagem de rastreamento de objetos baseada no rastreamento de características específicas.

Como forma de subsidiar este objetivo geral, são determinados alguns objetivos específicos:

- Analisar os parâmetros que fomentam o funcionamento do programa;
- Avaliar a aplicabilidade do programa no cenário brasileiro;
- Identificar as possíveis aplicações dos resultados como dados de estudo no contexto da segurança viária e, principalmente, da técnica de análise de conflitos.

1.4. JUSTIFICATIVA

A dificuldade de se obter um sistema com segurança viária realmente eficiente representa grandes perdas econômicas e sociais para qualquer país. Isso requer que esse tema seja bastante estudado a fim de serem implementadas medidas que garantam maior segurança aos usuários. As técnicas utilizadas hoje, entretanto, são abordagens reativas que dependem de uma grande quantidade de dados de sinistros para que uma medida seja tomada.

As limitações apresentadas por esses métodos reativos implicam na necessidade do desenvolvimento de novas abordagens como as medidas de segurança complementares, que têm como principal representante a Técnica de Análise de Conflitos. Entretanto, mesmo com o grande desenvolvimento dessa técnica e constantes estudos para aprimorá-la, no Brasil, a sua utilização ainda é praticamente inexistente. Além disso, com a permanente evolução da tecnologia, a visão computacional, destacando-se o rastreamento de objetos, tem-se apresentado como uma ferramenta importantíssima, gerando ótimos resultados em diversas áreas da engenharia de transportes.

Assim sendo, procura-se conciliar esses dois aspectos, que já vêm sendo estudados e aprimorados, na tentativa de verificar sua real contribuição para uma melhor avaliação da segurança local, aplicado a um contexto brasileiro.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. SEGURANÇA VIÁRIA

A segurança viária diz respeito ao conjunto de métodos e medidas empregados com o objetivo de reduzir o risco de sinistros de trânsito na rede viária. O estudo e o aperfeiçoamento das técnicas de análise dessa segurança são de grande importância e devem ser prioridade para qualquer organização ou governo, visto que os sinistros de trânsito causam um significativo impacto pessoal e têm efeito no desenvolvimento social e econômico dos países, principalmente daqueles em desenvolvimento (MAHMUD *et al.*, 2018).

Os sinistros de trânsito são responsáveis pela morte de aproximadamente 1,35 milhão de pessoas por ano ao redor do mundo, além de causarem lesões não fatais em 20 a 50 milhões de pessoas (OMS, 2021). Estima-se que esta seja a oitava maior causa de mortes em todo o mundo, com um impacto similar ao causado por diversas doenças transmissíveis, como a malária (MAHMUD *et al.*, 2018).

Além da questão de saúde nacional, as lesões causadas pelo trânsito possuem grande impacto na economia, custando aos países cerca de 3% do seu PIB anual. Essa situação está muito atrelada ao fato de que, entre os jovens (com idade entre 15 e 29 anos), os sinistros de trânsito são a principal causa de morte, o que representa grande prejuízo, visto que esses estariam entrando em seus anos mais produtivos para a sociedade (BHALLA *et al.*, 2014).

No contexto de se alcançar o melhor resultado no que concerne à segurança no trânsito, diversas políticas e abordagens foram sendo desenvolvidas, entre elas, a Visão Zero. Essa política, adotada na Suécia em 1997, baseia-se na premissa de que a ocorrência de mortes ou ferimentos graves é inaceitável enquanto a pessoa estiver movendo-se pelo sistema viário. O Zero não é uma meta que deve ser alcançada em uma data específica. É uma mudança da ênfase em problemas atuais e possíveis formas de reduzi-los para uma percepção sobre qual deve ser o estado ideal de um sistema de transporte viário (TINGVALL, HAWORTH, 1999).

A Visão Zero entende que a vida humana é prioridade, sobrepondo-se à eficiência da mobilidade e qualquer outro objetivo do sistema viário. Reconhece, também, que os humanos erram e tais erros são inevitáveis, devendo ser considerados como parte do processo de planejamento de um projeto de rodovia. Essa abordagem busca enxergar as causas

fundamentais dos problemas de segurança viária que ocorrem, em sua maioria, em função de problemas do desenho do sistema de transporte (PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO PAULO, 2021).

Por mais importante que seja a avaliação da segurança viária e existam políticas como a Visão Zero, quase todas as iniciativas de segurança ainda estão confinadas a abordagens tradicionais. Essas são pautadas em dados históricos de sinistros de trânsito ou no julgamento pessoal de especialistas, sendo que ambas apresentam limitações significativas e são consideradas análises reativas.

A segurança no trânsito é comumente medida em termos do número de sinistros e suas consequências, levando em consideração as perdas de vida e perdas materiais ou a gravidade dos sinistros. Essa abordagem é totalmente dependente dos dados históricos dos sinistros, análise que apresenta diversas desvantagens em termos de disponibilidade, consistência e qualidade. A demora inerente à coleta dos dados limita sua aplicação como uma ferramenta de avaliação rápida da eficácia de novos tratamentos de engenharia e do risco associado à implementação de novas tecnologias (ARUN *et al.*, 2021); a utilização de dados históricos apresenta-se como uma abordagem reativa, necessitando que um número significativo de sinistros ocorra para que alguma ação seja tomada; tais dados, por diversas vezes, só estão disponíveis por meio de pequenas amostras, o que pode levar a resultados inconclusivos (TARKO *et al.*, 2009), além de várias colisões não fatais não serem registradas ou serem registradas de forma incompleta.

No âmbito das abordagens tradicionais, inclui-se aquelas que avaliam a segurança de uma rodovia baseando-se nas características da estrada e no ambiente no qual ela está inserida e são totalmente dependentes do julgamento pessoal de algum especialista. Nesse sentido, destaca-se a Auditoria de Segurança Viária (ASV).

A Auditoria de Segurança Viária tem o objetivo de diminuir a probabilidade de sinistros de trânsito por meio da execução de vistorias periódicas focando nas questões de segurança (NODARI, LINDAU, 2001). Os auditores devem ter habilidades especializadas e, embora essa auditoria possua grande importância, implementá-la é bastante complicado devido à falta de profissionais capacitados, principalmente no Brasil, no qual a realização de ASV é ainda muito

incipiente. Outro problema na implementação dessa metodologia é seu imenso caráter subjetivo, tendo-se todos os resultados baseados apenas no julgamento dos auditores.

Diante dos diversos problemas associados às abordagens tradicionais, o desenvolvimento de pesquisas de indicadores alternativos de segurança viária tem sido incentivado, principalmente no que concerne ao desenvolvimento da Técnica de Análise de Conflitos. Tal técnica fornece uma compressão mais profunda do mecanismo de falha e da cadeia de eventos que levam à ocorrência de uma colisão e de suas consequências (SAYED, ZEIN, 1999), além de configurar uma abordagem proativa da segurança viária.

A Técnica de Análise de Conflitos utiliza-se da determinação de indicadores de conflitos, que apresentam como principal vantagem a capacidade de capturar os dados de forma objetiva e quantitativa em um período de tempo bem menor em comparação com a análise reativa. Dessa forma, o problema associado ao registro e à compilação dos longos dados de sinistros de trânsito não se aplica, o que faz com que a avaliação de programas de segurança e da eficácia de intervenções possa ocorrer em um período de tempo bem mais curto (MAHMUD *et al.*, 2018).

No que diz respeito aos termos utilizados nesse trabalho, salienta-se que a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) publicou a revisão da NBR 10697/2018 e redefiniu os termos técnicos utilizados na execução de estudos e pesquisas relacionadas à incidentes de trânsito. A norma corrige a expressão “acidente de trânsito” para “sinistro de trânsito” e suprime o entendimento de sinistro “não premeditado”. Tal mudança ocorreu com o intuito de eliminar o caráter imprevisível e incontrolável que o termo acidente atribuía aos incidentes de tráfego, isso porque esses não são acidentais e sim provocados e, mais ainda, passíveis de prevenção. Dessa forma, a norma apresenta a seguinte definição para o termo “sinistro de trânsito”:

Todo evento que resulte em dano ao veículo ou à sua carga e/ou em lesões a pessoas e/ou animais, e que possa trazer dano material ou prejuízos ao trânsito, à via ou ao meio ambiente, em que pelo menos uma das partes está em movimento nas vias terrestres ou em áreas abertas ao público (ABNT, 2020, p.01)

Assim, atendendo ao normativo e às considerações apresentadas, este trabalho utiliza a terminologia de “sinistro de trânsito” em oposição ao termo “acidente de trânsito”.

2.2. MEDIDAS DE SEGURANÇA COMPLEMENTARES

Em alternativa às iniciativas de segurança viária tradicionais (reativas), foram desenvolvidas algumas medidas de segurança complementares com o intuito de identificar os fatores que podem causar deficiências de segurança de forma mais objetiva e rápida.

Para que seja útil para as aplicações de segurança de transporte, a medida deve obedecer às seguintes condições: deve ser baseada em um evento observável sem colisão e que esteja fisicamente relacionado, de uma forma previsível e confiável, com as colisões; e deve existir um método prático para relacionar os eventos sem colisão com uma frequência e/ou gravidade de colisões (TARKO *et al.*, 2009).

Diversas medidas foram aplicadas na tentativa de superar as dificuldades apresentadas pelas abordagens tradicionais. O Quadro 2.1 apresenta algumas dessas medidas, bem como suas respectivas descrições.

Quadro 2.1: Descrição de algumas Medidas de Segurança Complementares

Medida Complementar	Descrição
Variações de velocidade	Calculada a partir da velocidade individual do veículo observada em uma área especificada durante um determinado tempo. Altas variações de velocidade implicam em um tráfego menos uniforme o que pode comprometer a segurança (ISHAK <i>et al.</i> , 2012).
Desacelerações desconfortáveis	Analisa a desaceleração dos veículos sendo que uma desaceleração é considerada desconfortável se a sua taxa for maior que 10 ft/s^2 ($3,5 \text{ m/s}^2$). Nesses casos a probabilidade de uma colisão traseira tende a aumentar (ISHAK <i>et al.</i> , 2012).
Eventos críticos	Analisa comportamentos descuidados e imprudentes, como velocidades excessivas, mudanças de faixas abruptas e violações de sinal vermelho (TARKO <i>et al.</i> , 2009).
Tempo de viagem	Avalia o tempo necessário para que um veículo realize uma viagem entre dois pontos. Pode fornecer informações sobre eficiência da rota, número de paradas, volumes de serviço, entre outros (PERKINS, 1981).
Velocidade pontual	Permite avaliar a velocidade dos veículos e obter uma média, o 85 percentil*, a variação de velocidade e o número de violações da velocidade (PERKINS, 1981).
Comprimento da fila	Permite avaliar o comprimento médio da fila e o tempo de espera em cruzamentos e rodovias (PERKINS, 1981). Longas filas indicam maiores probabilidades de colisões.

* Corresponde à velocidade abaixo da qual 85% dos veículos trafegam em uma via sob as condições prevalentes do tráfego.

A Técnica de Análise de Conflitos é uma das medidas proativas mais bem aceitas para diagnosticar os problemas de segurança viária. Esta permite que ações corretivas sejam tomadas sem a necessidade de esperar a acumulação de informações sobre os sinistros ou de empregar grandes equipes especializadas, como é o caso da ASV.

2.3. TÉCNICA DE ANÁLISE DE CONFLITOS

O conceito de conflito de tráfego foi proposto pela primeira vez por Perkins e Harris (1968) como uma “alternativa aos dados de colisão, que em muitos casos são escassos, não confiáveis e insatisfatórios”. O objetivo era definir eventos ou incidências de tráfego que ocorrem com frequência, que podem ser claramente observados e estão relacionados a colisões (SAYED *et al.*, 2013).

Os conflitos são mais recorrentes que os sinistros e possuem um custo social desprezível, dessa forma, representam grande vantagem quando comparados aos dados históricos de colisões. Além disso, os conflitos e as violações de trânsito podem revelar informações indispensáveis sobre a segurança de determinado local, como os pontos mais perigosos, as soluções de engenharia viária que não estejam sendo totalmente eficientes e até mesmo características da direção dos motoristas da região.

A técnica fornece um meio para que os analistas observem e avaliem, imediatamente, as manobras de direção inseguras. No entanto, a conceituação incompleta e o custo de treinamento de observadores, bem como o custo envolvido na coleta de dados de conflito, têm sido fatores que inibem a extensa aplicação da técnica. Por outro lado, a automação bem sucedida da extração de conflitos de dados de sensores de vídeo usando técnicas de visão computacional têm apresentado benefícios práticos para a análise da segurança de tráfego (SAUNIER, SAYED, 2007).

A técnica de análise de conflitos já possui cerca de 50 anos de desenvolvimento e existe um acordo razoável sobre sua utilidade como uma medida de segurança complementar. Dessa forma, a partir dos diversos estudos que vem sendo desenvolvidos alguns autores argumentam que a técnica está, atualmente, passando por um período de transição da fase dos experimentos para a fase de aplicação. Apesar desse crescente desenvolvimento como importante abordagem

dentro do cenário da segurança viária, ainda não existe um consenso conceitual entre os pesquisadores (ZHENG *et al.*, 2014).

Dito isso, as diferentes abordagens existentes, os detalhes de aplicação da metodologia, e algumas dificuldades relacionadas ao emprego da Técnica de Análise de Conflitos serão abordados a seguir e são apresentadas na Figura 2.1.

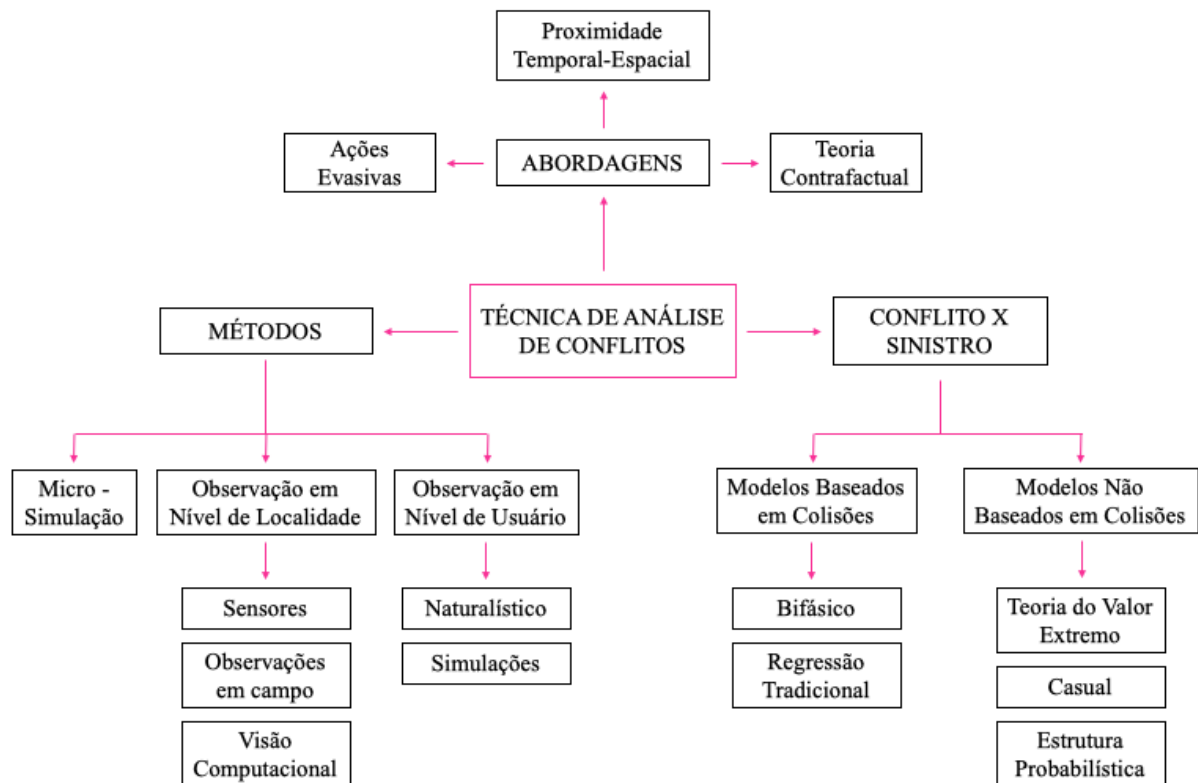


Figura 2.1: Fluxograma sobre o estudo da técnica de análise de conflitos

Fonte: PERNA, 2021

2.3.1. RELAÇÃO CONFLITO X SINISTRO

A utilização da técnica de análise de conflitos como uma medida de segurança complementar tem sido bastante difundida nos últimos anos. Entretanto, sua validade como uma técnica preditiva está atrelada à relação entre os conflitos e os sinistros de trânsito. Tal validade é avaliada por meio da significância estatística da correlação entre os dois eventos, assim, quanto melhor for a capacidade da contagem dos conflitos para prever o número de colisões, maior será a legitimidade da técnica. Dessa forma, antes de se analisar as características e parâmetros da técnica de análise de conflitos, a relação entre as colisões e os conflitos deve ser estabelecida.

Uma interação entre dois usuários da rodovia é definida como uma situação na qual dois ou mais usuários estão perto o suficiente no tempo e no espaço e a distância entre eles está diminuindo. Diversos pesquisadores, com destaque para Hydén (1987), propuseram que todas as interações poderiam ser ranqueadas em uma hierarquia de segurança, com as colisões no topo. As interações logo abaixo das colisões seriam chamadas de *quase-colisões*, representando os eventos bem semelhantes a uma colisão, mas sem que a colisão ocorra de fato, e a classificação continuaria recursivamente, com *quase-quase-colisões* e assim por diante.

O formato de pirâmide para a hierarquia representaria a frequência de ocorrência dos eventos, com as colisões sendo mais raras e graves, e as interações presentes na base da pirâmide sendo mais frequentes e leves (SAUNIER, SAYED, 2008). A Figura 2.2 apresenta a representação da pirâmide da hierarquia de segurança.

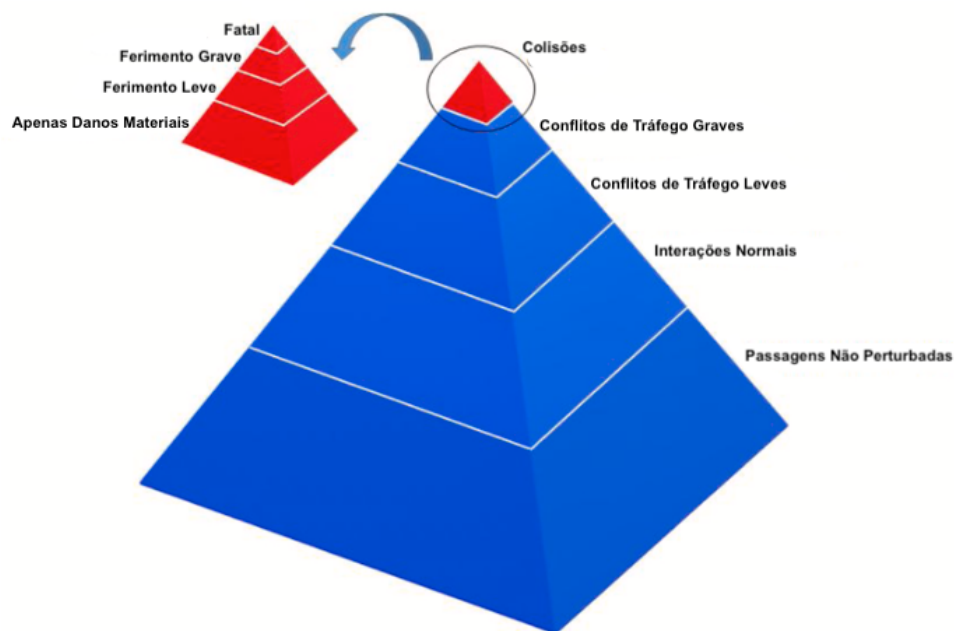


Figura 2.2: Pirâmide de segurança de eventos de trânsito

Fonte: ARUN *et al.* 2021, adaptado.

Para cada interação presente na hierarquia, torna-se possível relacionar sua localização na pirâmide com a possibilidade de ocorrência de uma colisão, estimando sua gravidade. Entretanto, para que essa relação possa de fato ocorrer, é necessário determinar alguns parâmetros mensuráveis, ou seja, indicadores de gravidade que consigam avaliar a distância no espaço e no tempo entre os veículos envolvidos. Esses indicadores serão melhor abordados nos capítulos seguintes.

Uma outra representação menos difundida dessa relação de gravidade entre os eventos é a ideia de um função de distribuição em termos de proximidade a uma colisão proposta, como apresentado na Figura 2.3 (CHIN, QUEK, 1997).

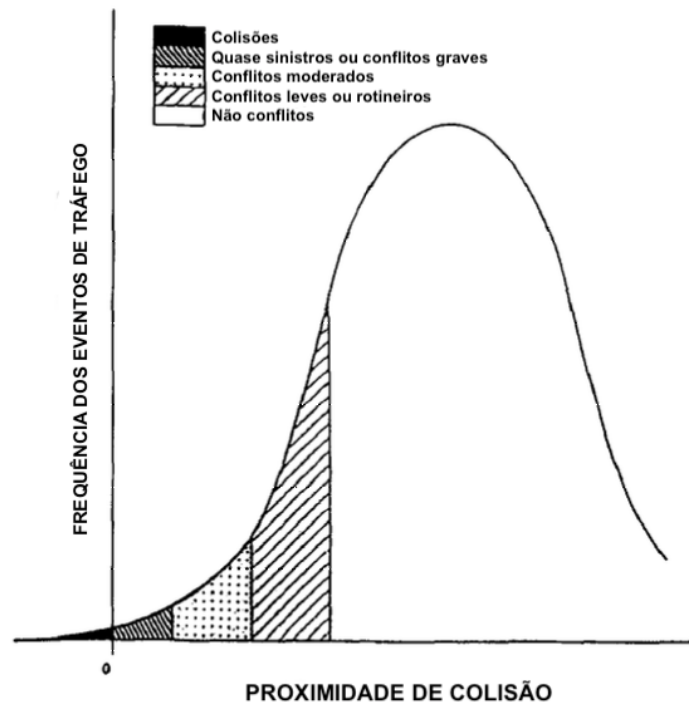


Figura 2.3: Representação dos conflitos em termos de proximidade de colisão

Fonte: CHIN, QUEK, 1997, adaptado.

As duas abordagens apresentadas demonstram que os não-conflitos formam a maior proporção de eventos observados, enquanto que a frequência de observação dos conflitos diminui à medida que a gravidade da situação aumenta.

A noção de que os conflitos são potenciais colisões, mas com um menor grau de perigo, sugere que uma representação contínua entre os conflitos e os sinistros possa ser adotada. Entretanto, por mais que as representações consigam explicar e exemplificar o conceito de conflito de forma mais precisa na tentativa de se atingir uma uniformidade na interpretação, o problema da inconsistência permanece. A definição e diferenciação consistentes e claras dos diferentes tipos de conflitos são difíceis de serem alcançadas na prática (CHIN, QUEK, 1997).

Consequentemente, o estabelecimento da relação supramencionada sugere resultados contraditórios. Alguns estudos apresentaram uma forte correlação entre os conflitos de tráfego e as colisões, demonstrando que conflitos mais severos estariam atrelados a uma maior

probabilidade de ocorrência de um sinistro (LU *et al.*, 2012); enquanto outros encontraram uma relação pobre que não determinava nenhum tipo de aumento na probabilidade de ocorrência de sinistros, mesmo que muitas vezes devido a inconsistências metodológicas nos estudos (WILLIAMS, 1981).

Uma terceira corrente de pesquisadores acredita que esse tipo de validação é exagerada e desnecessária devido ao fato de que a segurança viária representa a ausência de sinistros de trânsito. Assim, a técnica de análise de conflitos seria uma ferramenta para avaliar o comportamento do usuário do sistema viário, demonstrando potenciais problemas de segurança, ao invés de ser um previsor de colisões (ZHENG *et al.*, 2014).

A realização de estudos com o intuito de investigar a relação entre conflitos e colisões demanda o consumo de muitos esforços. Parte desses foram utilizados para estabelecer alguns modelos: modelos que dependem da contagem de sinistros e modelos não baseados nos sinistros de trânsito. Os modelos baseados na colisão (*crash based models*) podem ser divididos em duas abordagens (ZHENG *et al.*, 2014):

- Modelo de regressão tradicional: a partir das contagens de conflitos e de colisões, a relação pode ser estabelecida diretamente por técnicas de regressão. Dessa forma, os conflitos de tráfego seriam interpretados como oportunidades de sinistro, sendo que algumas levariam de fato ao evento;
- Modelo bifásico: tem-se uma primeira fase na qual um modelo log-normal é empregado para prever os conflitos usando o volume de tráfego, o tipo de área (se urbana ou suburbana) e algumas variáveis geométricas. Em seguida, na segunda fase, o modelo binomial negativo baseado em conflitos é empregado para prever as colisões (EL-BASYOUNY, SAYED, 2013).

Já os modelos não baseados em colisões (*non-crash-based models*) são divididos em três abordagens:

- Modelo de teoria do valor extremo: quantifica o comportamento estocástico de um processo, sendo que este é suave o suficiente para permitir a extrapolação para níveis que não foram observados. Assim, utilizam-se os conflitos de tráfego mais frequentes para prever os sinistros menos frequentes. As interações entre os usuários do sistema terão seu risco de colisão estimados por meio dos valores das medidas de conflito (indicadores);

- Modelo causal: a partir da percepção de que se dois usuários da via tivessem mantido seus movimentos inalterados, provavelmente ter-se-ia a ocorrência de uma colisão, o evento seria determinado por suas condições iniciais e pelas ações evasivas realizadas;
- Modelo baseado na estrutura probabilística baseada em todos os pontos de colisão possíveis: calcula a probabilidade de colisão entre dois usuários que interagiram em um determinado instante, somando a probabilidade de colisão sobre todos os movimentos possíveis que podem levar a uma colisão. Um componente importante do modelo é prever as possíveis posições futuras dos usuários por meio da extrapolação do movimento.

O modelo baseado na estrutura probabilística baseada em todos os pontos de colisão possíveis é a metodologia adequada para detecção dos conflitos de tráfego por um sistema automatizado que pode extrair informações individuais sobre a trajetória de cada usuário da via.

Por mais que a discussão sobre a confiabilidade ou não da técnica de análise de conflitos exista e seja constantemente alimentada pelo desenvolvimento de novos testes e novas pesquisas, a ideia de que a redução dos conflitos gera como consequência a redução, mesmo que pequena, das colisões e sinistros de trânsito é mais aceita por todas as correntes de pesquisadores (LU *et al.*, 2011).

2.3.2. ABORDAGENS DA TÉCNICA DE ANÁLISE DE CONFLITOS

Existem, mesmo com a ampla aplicação e atual desenvolvimento da técnica, disputas sobre como, de fato, determinar um conflito de tráfego. Nesse contexto, torna-se possível separar a maioria das abordagens em dois grupos: aqueles que classificam o conflito baseando-o em ações evasivas e os que o baseiam na proximidade temporal-espacial.

No que concerne à primeira abordagem, um conflito de tráfego seria qualquer situação que apresenta o potencial de gerar um sinistro de trânsito, sendo que tal conflito, essencialmente, seria definido pela ocorrência de ações evasivas que o motorista é forçado a realizar para evitar uma colisão (PERKINS; HARRIS, 1968). Parker e Zegeer (1989) acrescentam a essa definição o entendimento de que a manobra evasiva realizada, caracterizada como uma frenagem ou uma manobra de desvio, é decorrente da ação de um outro motorista.

Já a segunda abordagem baseia a determinação de um conflito de tráfego na proximidade temporal-espacial e avalia, justamente, o quão próximos no tempo e/ou no espaço dois usuários do sistema de tráfego estão, fazendo bastante uso dos indicadores de conflitos.

Existe uma terceira abordagem não muito difundida que caracteriza os conflitos a partir de uma teoria contrafactual. Nesta, os conflitos são definidos como a probabilidade contrafactual de ocorrência de uma colisão, ou seja, a probabilidade de se obter uma colisão se as ações evasivas executadas pelo usuário forem malsucedidas. Portanto, se houver uma probabilidade contrafactual significativa associada a um evento de tráfego, esse evento pode ser chamado de conflito (DAVIS *et al.*, 2011).

a) Ações evasivas

Estudos sobre os tipos de conflitos baseados em ações evasivas foram amplamente realizados analisando-se situações de interseção, sendo, originalmente, executados por Perkins e Harris (1968). Os autores definiram cinco categorias básicas de conflitos que poderiam ocorrer nessa configuração: conflitos com conversão à esquerda (*left-turn*), conflitos de desvio (*weave*), conflitos de cruzamento (*cross-traffic*), conflitos de violação de sinal vermelho (*red-light violation*) e conflitos de colisão traseira (*rear-end-incidents*). Esses são apresentados e descritos no Quadro 2.2.

Quadro 2.2: Tipos de Conflitos de Tráfego definidos por Perkins e Harris (1968)

Conflito de Tráfego	Descrição
Conversão à esquerda (<i>left-turn</i>)	Ocorre quando um veículo, ao realizar uma curva para a esquerda, atravessa na frente de outro que realizava sua trajetória em linha reta, obrigando-o a frear ou desviar
Desvio (<i>weave</i>)	Ocorre quando um veículo muda de faixa colocando-se à frente de outro que é obrigado a realizar um ação evasiva
Cruzamento (<i>cross-traffic</i>)	Ocorre quando um veículo atravessa ou realiza uma curva atrapalhando a trajetória retilínea que outro veículo com preferência realizada obrigando-o a frear ou desviar
Violação de sinal vermelho (<i>red-light violation</i>)	Ocorre quando um veículo entra na interseção ignorando a sinalização que o impedia.
Colisão traseira (<i>rear-end-incidentes</i>)	Decorrem da parada abrupta de um veículo que obriga o veículo seguinte a realizar uma manobra de frenagem ou de desvio para evitar a colisão traseira. Dividido em quatro tipos: quando o veículo para prematuramente no sinal amarelo; para ou desacelera para realização de uma curva; para ou desacelera em linha reta; e para ou desacelera por estar envolvido em um conflito.

Fonte: informações retiradas de PERKINS, HARRIS, 1968.

Independentemente do tipo, o critério que caracteriza o evento como um conflito de tráfego é a ação que o veículo é forçado a realizar, sendo evidenciada pelas luzes de freio, quando ocorre a frenagem, ou pela mudança de faixa, quando a colisão é evitada por meio do desvio.

A Figura 2.4 apresenta a exemplificação de três dos conflitos mencionados: o conflito com conversão à esquerda, o conflito de desvio e o conflito de cruzamento, respectivamente.

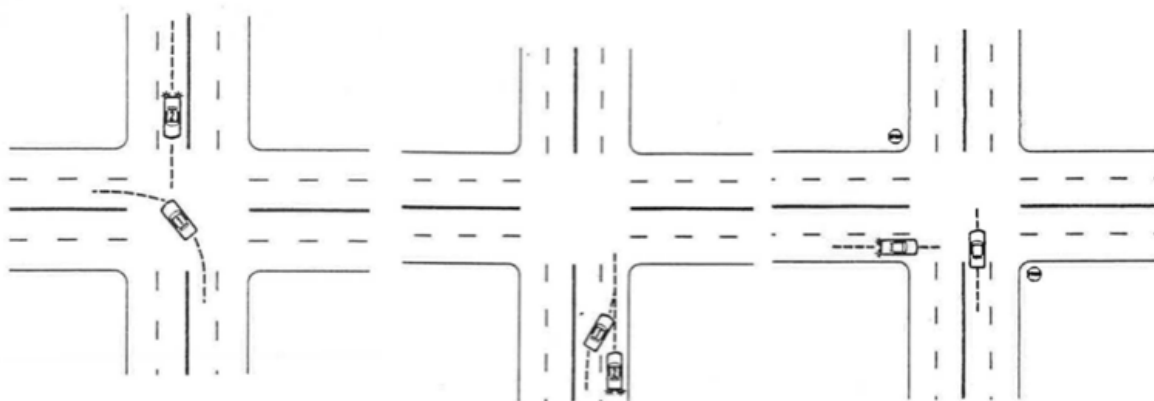


Figura 2.4: Categorias de conflitos por ações evasivas: conflito com conversão à esquerda, conflito de desvio e conflito de cruzamento

Fonte: PERKINS, HARRIS, 1968

Essa caracterização dos conflitos baseada nas possíveis ações evasivas, seria uma forma extremamente útil e simples, sem a necessidade de utilização de tecnologias avançadas, de se registrar a aparência de conflitos de tráfego. Entretanto, para que essa análise pudesse ser realmente realizada, uma lista com todas as possíveis ações evasivas associadas aos conflitos teria que ser especificada. Essa situação é extremamente desafiadora, visto que diversas pesquisas vêm apresentando resultados distintos e variados, o que agrega, paulatinamente, mais considerações ao contexto das ações evasivas. Além disso, a existência de tantos possíveis eventos de tráfego, faz com que o observador tenha que julgar muitas situações utilizando sua experiência pessoal, o que atribui um caráter subjetivo à análise (PIETRANTONIO, 1991).

Parker e Zegeer (1989), por exemplo, determinaram sete categorias de conflitos, sendo cinco delas bem semelhantes às apresentadas anteriormente, mas acrescentaram duas que ainda não haviam sido exploradas: os sinistros causados por pedestres que atravessam na frente de veículos que têm preferência, os conflitos com pedestres (*pedestrian*); e os conflitos secundários (*secondary*), nos quais um segundo motorista, motivado pela ação de um primeiro,

é obrigado a realizar uma manobra evasiva que coloca outro usuário do sistema rodoviário em perigo de colisão.

As concepções de que somente a observação seria suficiente para identificar e caracterizar totalmente uma ação evasiva e de que para se mensurar a gravidade do sinistro de tráfego bastaria analisar a presença e a intensidade dessas ações são constantemente questionadas. Nesse sentido começaram a ser introduzidos e implementados alguns indicadores de conflitos baseados nessa abordagem.

Os indicadores de conflitos de tráfego possuem a grande vantagem de conseguirem determinar a gravidade de um conflito de uma forma objetiva e quantitativa. Os indicadores que se utilizam da abordagem de proximidade temporal-espacial já vêm sendo amplamente estudados e utilizados, como será melhor explanado no próximo tópico. Entretanto, por mais desenvolvida que seja essa abordagem, estudos recentes mostraram que tais indicadores não são tão apropriados para certos ambientes de tráfego, como em ambientes menos organizados e que apresentem uma grande variedade de tipos de usuários. Determinaram, também, que os indicadores baseados em ações evasivas possuem maior potencial de identificação dos conflitos (TAGELDIN; SAYED, 2016),

Nesse contexto, diversos indicadores são apresentados como melhor solução para determinar informações relevantes sobre a segurança viária. Como já foi comentado, a realização de uma ação evasiva geralmente pode ser definida a partir de uma mudança significativa na direção do trajeto ou da velocidade, por meio da aceleração e/ou frenagem (TAGELDIN; SAYED, 2015). Dessa forma, a maioria dos indicadores medirá algum parâmetro relacionado a essas mudanças, podendo ser destacados a taxa de desaceleração (*deceleration rate*), a taxa de guinada (*yaw-rate*) e o perfil jerk (*jerk profile*).

O Quadro 2.3 apresenta as definições dos indicadores supramencionados.

Quadro 2.3: Indicadores de Conflito baseados em Ações Evasivas

Indicador de conflito	Definição
Taxa de desaceleração	Consegue quantificar a magnitude de uma ação de desaceleração de um motorista em um conflito. Uma taxa maior sugere que o usuário tem menos tempo para frear (e desacelerar) para evitar a colisão e pode significar uma maior probabilidade de colisão.
Taxa de guinada	A rotação de guinada descreve um movimento em torno do eixo de guinada de um corpo que muda a sua direção para direita ou para esquerda. A taxa de guinada será a velocidade angular dessa rotação em torno do eixo z ou a taxa de mudança do ângulo da direção. Esses comportamentos de desvio podem ser quantificados a partir do “perfil de sinal da taxa de guinada” representado pela equação abaixo, na qual ψ é o ângulo de direção do veículo. Taxa de guinada $r(t) = \partial\psi/\partial t$
Perfil jerk	A intensidade de uma frenagem varia como uma reação ao ambiente de tráfego: a frenagem para parar atrás de um veículo em um sinal é diferente da frenagem executada quando deve-se evitar um pedestre que atravessa no meio da rua, por exemplo. Essa variação é contemplada pelo perfil de velocidade ao longo do tempo, denominado perfil jerk. Formalmente, o <i>jerk</i> é a derivada da aceleração.

Fonte: informações retiradas de TAGELDIN, SAYED, 2015.

Por fim, existe um último problema conceitual ao definir os conflitos de tráfego. A abordagem relaciona as ações evasivas ao sinistros, o que fica ainda mais claro por meio dos indicadores, porém várias colisões ocorrem sem que nenhuma ação tenha sido realizada, ocorrendo, justamente, pela não execução da ação evasiva. Além disso, nem toda ação evasiva é executada para evitar situações perigosas, algumas são utilizadas apenas como medidas de precaução (ZHENG *et al.*, 2014). Dessa forma, a diferenciação entre uma ação preventiva e uma verdadeiramente evasiva deve ser bem abordada e estudada, embora essa diferenciação possa ser bem difícil de ser realizada quando uma avaliação rápida é exigida por parte do observador (MAHMUD *et al.*, 2018).

Por mais que a correlação entre colisões e conflitos seja difícil de ser definida quando a única fundamentação são as ações evasivas observadas, essa relação é constantemente usada como suporte para validar o caráter preditivo da técnica de análise de conflitos (MAHMUD *et al.*, 2018).

b) Proximidade Temporal-Espacial

A definição geral para essa abordagem da análise de conflitos é “uma situação observável na qual dois ou mais usuários se aproximam no tempo e no espaço a tal ponto que a colisão é iminente se seus movimentos permanecerem inalterados” (TIWARI *et al.*, 1998). Tal definição, entretanto, apresenta-se muito teórica e, assim, para que o conceito pudesse ser mais aplicável e operacional, pesquisadores desenvolveram diversas medidas de proximidade como indicadores de conflitos.

Estes indicadores, bem como os baseados em ações evasivas, são uma forma objetiva e quantitativa de avaliar gravidade. Porém, nesse caso, essa avaliação é realizada assumindo-se que a proximidade é uma substituta para a gravidade dos conflitos e quantificando-se vários aspectos temporais e espaciais do usuário da rodovia (TAGELDIN; SAYED, 2015). As medidas expressam o quão próximos motoristas estão de um potencial sinistro analisando suas trajetórias (DEBNATH *et al.*, 2014).

Diversos indicadores foram propostos para avaliar a segurança em diferentes condições de tráfego, de operação e de geometria. Estes podem ser divididos em dois grandes grupos, os indicadores temporais e os não-temporais, sendo que o último grupo engloba, principalmente, medidas de distância e de desaceleração (MAHMUD *et al.*, 2018).

Os indicadores temporais expressam a proximidade de colisão em termos do tempo que resta para que um sinistro ocorra ou em termos da diferença de tempo entre dois veículos que passam por um ponto em comum. Já os indicadores não-temporais determinam o risco de colisão a partir da distância mais próxima entre dois veículos ou da taxa de mudança da posição do veículo por ações do motorista (DEBNATH *et al.*, 2014).

Entre os indicadores temporais o mais utilizado é o *Time to Collision* (TTC). Esse é definido como o tempo esperado para que dois veículos se choquem se suas trajetórias e velocidades permanecerem inalteradas (SAYED *et al.*, 2013), sendo que, para mensurá-lo, é necessário que exista um curso de colisão entre os veículos. Uma das vantagens desse indicador recai sobre a possibilidade de comparar seu valor crítico com medidas de tempo relacionadas à habilidade de direção do motorista. Um exemplo é a comparação com o tempo de percepção e reação do usuário: conflitos que tiverem valores críticos de TTC menores que o tempo de percepção e

reação indicam que talvez não exista tempo suficiente para que os motoristas consigam reagir e realizar uma ação que evite o sinistro (DEBNATH *et al.*, 2014).

Por mais que seja um indicador de ampla utilização, algumas desvantagens acerca do TTC fizeram com que alguns outros indicadores mais refinados e baseados neste fossem desenvolvidos. O *Time Exposed Time-to-Collision* (TET) e o *Time Integrated Time-to-Collision* (TIT) são apresentados no Quadro 2.4.

Outro indicador temporal de grande importância é o Post Encroachment Time (PET). Esse equivale ao espaço de tempo entre a saída de um veículo de um potencial ponto de colisão e a chegada de outro veículo nesse mesmo ponto (ALLEN *et al.*, 1978). O PET é muito indicado para conflitos nos quais dois veículos passam pelo mesmo ponto espacial com certa diferença de tempo, sem a necessidade de haver uma trajetória de colisão, como é o caso do TTC. Um exemplo é a situação na qual dois veículos se aproximam em uma interseção vindos de trajetórias perpendiculares entre si (DEBNATH *et al.*, 2014). Diversos indicadores derivados do PET já foram propostos na literatura, como o Intervalo de Tempo (*Gap time*), o *Encroachment Time* (ET), e o *Initially Attempted PET* (IAPET). Suas definições são apresentadas no Quadro 2.4.

No contexto de indicadores não-temporais, foram propostas medidas que explicam características espaciais ou cinemáticas das interações entre os veículos. A Proporção de Distância de Parada (PSD – *Proportion of Stopping Distance*), por exemplo, determina a relação entre a distância disponível para realização da manobra e a distância de parada necessária até um ponto de colisão projetado. Já a Taxa de Desaceleração Necessária (RDR – *Required Deceleration Rate*) representa a taxa uniforme máxima que um veículo deve adotar para desacelerar e evitar o sinistro (DEBNATH *et al.*, 2014).

Os indicadores temporais são popularmente mais utilizados do que os não-temporais por conseguirem integrar aspectos da proximidade espacial com a velocidade dos usuários. Porém, independentemente dos parâmetros adotados, a metodologia de determinar um conflito de tráfego por meio da abordagem de proximidade temporal-espacial recai sobre a ideia de definir os valores limites das medidas de eventos de tráfego e de se registrar apenas os conflitos que possuírem valores de parâmetro menores que o predeterminado.

Por exemplo, o TTC, dado em segundos, para um veículo i no instante t em relação a um veículo $i - 1$ que está à frente pode ser calculado por meio da Equação 2.1, na qual $\dot{X}$ corresponde à velocidade, X à posição e l ao comprimento do veículo (MINDERHOUD; BOVY, 2001).

$$TTC_i = \frac{X_{i-1}(t) - X_i(t) - l_i}{\dot{X}_i(t) - \dot{X}_{i-1}(t)} \quad \forall \dot{X}_i(t) > \dot{X}_{i-1}(t) \quad (2.1)$$

A partir dessa, quanto maior o valor de TTC, mais segura uma situação será, e, assim, só serão levados em consideração e melhor analisados os conflitos que possuírem os menores valores para esse indicador.

Apesar da constante utilização desses parâmetros e de sua importância no cenário da análise de conflitos, a vasta quantidade de medidas e a falta de consenso entre os pesquisadores sobre quais utilizar e quais valores limites adotar para as medidas são grandes complicadores, além de existirem estudos que sugerem a integração e a utilização de vários indicadores em cada situação.

Outro problema relacionado ao assunto é a diferença entre as premissas comumente adotadas para avaliar as situações. Alguns pesquisadores adotam um cenário no qual a velocidade e a direção dos veículos permanecem inalteradas, enquanto outros adotam direções inalteradas, mas consideram trajetórias com acelerações ou desacelerações constantes. No entanto, por mais que essas simplificações possam facilitar a análise, a complexidade do comportamento do tráfego pode fazer com que tais suposições simplistas não sejam realistas em alguns casos.

Sobre isso, tem-se os estudiosos que sugerem que devem ser consideradas todas as opções de movimentos possíveis durante o encontro entre os usuários para, depois, serem analisadas probabilisticamente (ZHENG *et al.*, 2014).

A Figura 2.5 apresenta a evolução e o desenvolvimento de alguns indicadores de conflito de tráfego por proximidade temporal-espacial durante os anos, enquanto o Quadro 2.4 descreve seus respectivos significados e definições.

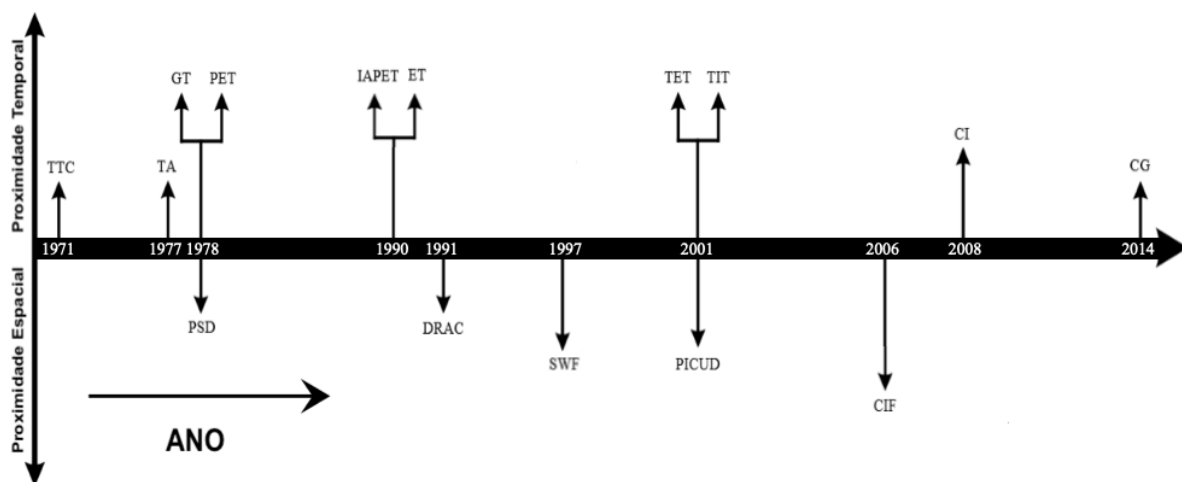


Figura 2.5: Evolução dos indicadores de conflito de tráfego por proximidade temporal e proximidade espacial

Fonte: MAHMUD *et al.*, 2018, adaptado

Quadro 2.4: Indicadores de Conflito de Tráfego por Proximidade Temporal-Espacial

Indicador	Significado	Definição
TTC	<i>Time to Collision</i>	Tempo esperado para que dois veículos se choquem se suas trajetórias e velocidades permanecerem inalteradas (SAYED <i>et al.</i> , 2013)
TA	<i>Time to Accident</i>	Tempo restante para que a colisão ocorra quando a ação evasiva é realizada por um usuário (KUSUMASTUTIE; RUSMANDANI, 2019)
PSD	Proporção de Distância de Parada (Proportion of Stopping Distance)	Determina a relação entre a distância disponível para realização da manobra e a distância de parada necessária até um ponto de colisão projetado (DEBNATH <i>et al.</i> , 2014)
GT	Intervalo de Tempo (<i>Gap Time</i>)	Intervalo de tempo entre a chegada de um veículo que está realizando a curva e a chegada de um veículo que está em trajetória reta, se ambos continuarem com mesmas velocidades e direções (GETTMAN; DEAD, 2003)
PET	<i>Post Encroachment Time</i>	Equivale ao espaço de tempo entre a saída de um veículo de um potencial ponto de colisão e a chegada de outro veículo nesse mesmo ponto (ALLEN <i>et al.</i> , 1978)
IAPET	<i>Initially Attempted PET</i>	Intervalo de tempo entre a chegada do veículo que faz a curva somado ao tempo esperado para que o veículo em linha reta atinja o ponto de colisão e o tempo de saída do veículo em curva (GETTMAN; DEAD, 2003)
ET	<i>Encroachment Time</i>	Tempo de duração durante qual o veículo que faz a curva infringe o direito de passagem do veículo que segue reto (GETTMAN; DEAD, 2003)
DRAC	Taxa de Desaceleração para Evitar a Colisão (<i>Deceleration Rate to Avoid the Crash</i>)	Taxa na qual um veículo precisa desacelerar para evitar uma colisão com o veículo dianteiro (DEBNATH; WILSON; HAWORTH, 2014)

Indicador	Significado	Definição
SWF	Frequência de Onda de Choque (<i>Shock-Wave Frequency</i>)	Consiste em variações no fluxo que propagam pelo tráfego e que podem viajar na direção do fluxo ou na direção contrária (VAN AREM; DE VOS; VANDERSCHUREN, 1997)
TET	<i>Time Exposed Time-to-Collision</i>	Definido como a duração de exposição a uma situação de segurança crítica de acordo com os valores do TTC (MINDERHOUD; BOVY, 2001)
TIT	<i>Time Integrated Time-to-Collision</i>	Definido como a integral do TTC para expressar o nível de segurança (MINDERHOUD; BOVY, 2001)
PICUD	<i>Potential Index for Collision with Urgent Deceleration</i>	Avalia o risco de sinistro entre veículos consecutivos e de velocidades semelhantes (MAHMUD <i>et al.</i> , 2018)
CIF	Função de índice de Criticidade (<i>Criticality Index Function</i>)	Tenta determinar a gravidade e a probabilidade de um possível conflito, mesmo que o sinistro não ocorra de fato. Pode ser descrito como o quociente entre o quadrado da velocidade de o TTC (CHAN, 2006)
CI	Índice de colisão (<i>Crash Index</i>)	Descreve a influência da velocidade na energia cinética nas colisões, podendo interpretar a gravidade e a probabilidade de um potencial conflito (MAHMUD <i>et al.</i> , 2018)
CG	Espaço Crítico (<i>Critical Gap</i>)	Para um veículo mudar de faixa é necessário certo espaço e, para cada veículo existe uma área na qual essa manobra pode ser feita evitando colisões, a região crítica. Essa região é composta por espaços em diversas direções. Na direção radial, que requer um espaço maior de segurança, tem-se o espaço crítico (CAO <i>et al.</i> , 2014)

2.3.3. MÉTODOS

Atualmente, os conflitos de tráfego podem ser coletados e observados por meio de três métodos: a observação no nível do usuário da rodovia, a observação no nível da instalação e a microsimulação. Cada um desses métodos possui ainda algumas subdivisões e formas diferentes de se observar os conflitos.

Considerando que esse trabalho observará os conflitos de tráfego por meio da análise de vídeos, utilizando uma abordagem de visão computacional, serão destacadas as metodologias que priorizam a real visualização do conflito, como a direção naturalística, a observação em campo e a técnica de visão computacional, e não sua simulação. Dessa forma, as técnicas de simulação da direção e de microsimulação serão apenas comentadas.

a) Observação em Nível de Usuário

Essa metodologia observa os conflitos sob o ponto de vista dos usuários da rodovia e possui como principal fonte de coleta de dados a utilização do **Modelo Naturalístico**. Este consiste na instrumentação de veículos com câmeras que capturam em vídeo o motorista e a estrada à frente de forma contínua durante a direção. Além dessas câmeras, os veículos são equipados com sensores que registram a aceleração e, que em alguns casos, conseguem determinar a proximidade entre este e um outro veículo e os potenciais obstáculos da trajetória.

Essa metodologia de obtenção de dados é capaz de registrar por vários meses ou anos as manobras, o comportamento dos motoristas e as condições externas de direção e gravar toda essa informação em um sistema de aquisição de dados de bordo (*On-board Data Acquisition System – DAS*). O DAS consiste em câmeras para a gravação em vídeo, em sensores cinemáticos, em radares, em dispositivos de rastreamento e em um disco rígido para armazenamento, de forma que este seja capaz de registrar virtualmente todas as ações do veículo observado antes, durante e após qualquer evento. (WU, JOVANIS, 2012).

Para que seja possível obter uma análise realista dos conflitos de tráfego, os motoristas são instruídos a dirigir da forma mais natural possível, sem qualquer tipo de protocolo que caracterize uma simulação ou algum tipo de teste. Dessa forma, os pesquisadores tornam-se capazes de obter informações sobre as reações e comportamentos do usuário do sistema rodoviário em situações ordinárias, de conflito e até mesmo em colisões. Essa dependência da condução dos motoristas, entretanto, pode configurar um problema do método naturalístico. A aleatoriedade presente na escolha dos veículos participantes pode esbarrar na relutância dos motoristas em terem seus veículos monitorados detalhadamente.

A análise naturalística possui um grande potencial para o melhor entendimento das principais causas dos sinistros de trânsito e, com isso, para melhorar a segurança viária, por apresentar uma perspectiva longitudinal do comportamento do usuário e das causas de colisões. No entanto, a metodologia estatística necessária para extração dos dados que permitirão a confirmação desse potencial ainda está em fase de desenvolvimento e carece de grandes esforços de pesquisas que devem ser direcionados ao desenvolvimento de abordagens estatísticas apropriadas para análise dos dados (JONASSON, ROOTZEN, 2014).

Tal dificuldade estatística de extração está atrelada à grande quantidade de vídeos que é gerada da análise de um veículo, tornando-se complexa a distinção entre o que é útil para o estudo e o que não é. Outrossim, o custo envolvido na análise de um veículo é muito alto, o que limita a quantidade desses no estudo, além de, por diversas vezes, a utilização dos dados pela comunidade pesquisadora ser impedida por questões legais e éticas (ZHENG *et al.*, 2014).

O outro método da observação em nível de usuário é o que consiste na realização de experimentos de **Simulador de Direção**. O interesse na aplicação de modelos de simulação destinados à segurança viária remonta à década de 1970. No entanto, o desenvolvimento e a melhora dos recursos computacionais, da tecnologia de coleta de dados e dos meios de comunicação determinaram um rápido aumento no interesse na última década. Dessa forma tem-se os modelos de simulação de segurança no trânsito em processo de crescente desenvolvimento (YOUNG *et al.*, 2014).

A utilização de simuladores adiciona à análise da segurança viária a capacidade de controlar o ambiente e as características da rodovia com o intuito de estudar problemas específicos com maior confiabilidade. Além disso, representa um jeito mais seguro de estudar os conflitos, principalmente quando se tem a presença de usuários mais vulneráveis na análise, como os pedestres e os ciclistas.

Por mais que os simuladores retratem um avanço no que concerne à observação dos conflitos de tráfego, estabelecer a validade de seus resultados ainda é um problema. Isso porque a falta de realismo da direção do mundo real juntamente com a ausência dos hábitos de direção e com os vícios do simulador podem produzir resultados enviesados (ARUM *et al.*, 2021).

b) Observação em Nível de Localidade

Apesar da observação sob o ponto de vista do usuário do sistema produzir resultados muito ricos em informações sobre as colisões, a coleta desses dados é consideravelmente demorada. Assim, diversos pesquisadores optam pela observação em nível de localidade, na qual tem-se a alocação de um observador treinado ou de sensores na área de tráfego que será examinada.

A **Técnica de Observação em Campo** pode ocorrer por meio da observação no local ou por meio da análise dos vídeos coletados. Em ambas as situações tem-se observadores treinados

que terão que reconhecer os conflitos e avalia-los conforme tipo e gravidade. A simplicidade de aplicação desse método levou diversos países a investirem nessa área, criando manuais e até mesmo desenvolvendo parâmetros próprios de análise, como etapas para preparação da pesquisa, detalhes de programação do tempo de observação, questões de segurança do observador, entre outros. Tais manuais possuíam o intuito de ensinar os possíveis observadores a determinarem os conflitos de tráfego de forma que se criasse toda uma metodologia padronizada e controlável.

É possível citar o manual de observação criado por Parker e Zegeer em 1989 no qual eles utilizaram a abordagem das ações evasivas para conceituar os conflitos. Os autores apresentaram os princípios básicos para reconhecimento dos conflitos, bem como diversos exemplos para elucidar as explicações. Entretanto, a impossibilidade de se listar todos os possíveis conflitos que os observadores poderiam vir a analisar atribuiu um caráter subjetivo ao procedimento. Isto é confirmado pelos dos autores que afirmam que os observadores teriam que julgar a maioria das situações a partir de sua experiência prévia.

O manual supramencionado é apenas um exemplo dos vários que foram sendo criados ao longo dos anos e que tiveram suas técnicas aplicadas com sucesso por diversas pesquisas. Porém, essa gama de metodologias e parâmetros torna muito difícil a comparação entre estudos realizados por técnicas diferentes, dificultando a padronização e a consequente evolução do método da observação em campo como um todo.

Um outro aspecto já mencionado é a questão da subjetividade. Além da impossibilidade de se listar todas as possibilidade de conflitos, a própria observação do mesmo evento por dois indivíduos diferentes pode ocasionar diferentes interpretações. Por fim, uma última desvantagem da utilização desse método é seu custo elevado e a necessidade de realização de um trabalho muito intenso para obtenção de bons resultados.



Figura 2.6: Observador treinado analisando uma interseção

Fonte: PARKER, ZEEGER, 1989

A utilização de **Sensores** para observação dos conflitos apresenta grande variedade de equipamentos capazes de realizar a tarefa, como os detectores de loop indutivo, os radares de micro-ondas e os magnetômetros de placa. As desvantagens da utilização desses sensores são que eles geralmente não fornecem detalhes microscópicos sobre as interações do tráfego e que, quando comparados com a observação em campo e com a metodologia computacional de análise de vídeos, seus resultados costumam ser menos precisos (ARUM *et al.*, 2021).

A última metodologia inserida no contexto da observação em nível de localidade é a **Técnica de Visão Computacional**. A determinação de conflitos de tráfego por meio desta baseia-se na análise de vídeos por meio de algoritmos que irão rastrear os objetos que estão em movimento. O sistema utilizado para o monitoramento dos eventos precisa possuir um alto nível de entendimento da cena que foi gravada e geralmente é composto por dois módulos: um processador de vídeo para detecção e rastreamento dos veículos e um módulo de interpretação e detecção dos conflitos de tráfego, sendo que a entrada do sistema é o fluxo de imagens obtido pelas câmeras.

A Figura 2.7 traz uma representação do sistema de detecção de conflitos composto por esses dois módulos.



Sequência de quadros (imagens)



Trajetórias de veículos reconstituídas



Conflitos de tráfego detectados
(ou sequências contendo-os)

Figura 2.7: Sistema de detecção de conflitos

Fonte: SAUNIER, SAYED, 2007, adaptado.

A detecção dos conflitos de tráfego com detalhes sobre os veículos envolvidos e suas trajetórias é uma tarefa bastante complicada e por vezes o resultado obtido não possui precisão necessária para ser utilizado de forma prática. Nesses casos, pode-se utilizar um sistema alternativo que seja capaz de separar as sequências de cenas que possuem conflitos, bem como reduzir ao mínimo a detecção de eventos falsos, ou seja, que não configuram um conflito. Dessa forma, esse sistema agiria como um filtro, resumindo horas de dados a minutos que contém eventos relevantes, para que esses sejam analisados por observadores treinados posteriormente.

A utilização das imagens e respectivas análises por meio de algoritmos é a forma mais eficiente e objetiva de determinação dos conflitos, além de serem utilizados eventos reais e não simulações. As câmeras de vídeo são um recurso barato para execução da pesquisa e possibilitam uma análise em grande escala devido à possibilidade de gravação dos conflitos. Porém, por mais animadora e por maior que seja seu potencial, essa alternativa ainda está em desenvolvimento, sendo necessária a melhoria dos algoritmos para rastreamentos e caracterizações mais precisos

c) Microsimulação

A microsimulação como forma de estudar e estimar os conflitos de tráfego tem ganhado força nos últimos anos. Essa metodologia é utilizada para simular as condições de fluxos de tráfego existentes na rede viária e consegue combinar as vantagens dos dois métodos anteriormente mencionados, visto que as observações em nível de localidade podem ser conduzidas enquanto se exerce um controle sobre a rodovia e os usuários.

Esse método possui diversas vantagens, como o tempo para coleta de dados e para posterior processamento das informações sendo bem mais curto que os outros métodos; a possibilidade de simular conflitos envolvendo qualquer tipo de usuário do sistema de tráfego; e sua extrema utilidade na avaliação de novas tecnologias e projetos emergentes por ser uma tecnologia bastante flexível.

Por outro lado, a precisão dos conflitos simulados é diretamente dependente dos modelos comportamentais e suposições adotadas. Situação que gera bastante complexidade à aplicação da tecnologia, considerando que tais modelos comportamentais dos usuários não estão amplamente disponíveis.

Independentemente da forma como esses dados serão coletados, as pesquisas sobre os conflitos de tráfego podem ser utilizadas para responder questões sobre problemas operacionais e de segurança, para recomendar tratamentos corretivos e até mesmo para avaliar a eficácia de soluções já implementadas (PETRANTONIO, 1991). Esses resultados devem ser utilizados em conjunto com características geométricas da interseção e dados históricos de sinistros e do tráfego da região, de modo que essa avaliação integrada garanta uma análise completa das operações de tráfego para que medidas de segurança condizentes com os problemas encontrados possam ser tomadas.

2.4. ANÁLISE COMPUTACIONAL DOS CONFLITOS DE TRÁFEGO

Nos últimos anos, métodos quantitativos baseados em medidas de segurança complementares têm sido amplamente utilizados. Entretanto, mensurar alguns dos parâmetros utilizados para medir a segurança configura um grande desafio. Nesse sentido, a investigação dos conflitos de tráfego por meio de programas computacionais que analisam vídeos do sistema de tráfego, principalmente interseções, é apresentada como solução para o problema por aumentar a confiabilidade da coleta de dados.

O monitoramento dos conflitos por meio da análise dos vídeos configura uma metodologia muito simples e barata de ser instalada, principalmente quando comparada aos detectores de loop indutivo, que são o tipo de sensor mais utilizado, e necessitam que a superfície da rodovia seja escavada. Ainda em comparação com os detectores, os vídeos possibilitam não apenas determinar a quantidade e a velocidade dos veículos, mas também estimar vários outros parâmetros de tráfego, como o tipo de veículo, o tempo de viagens e até a ocorrência de mudanças de faixa (BEYMER *et al.*, 1997).

Além disso, o método oferece uma descrição detalhada do tráfego, bem como a possibilidade de rastreamento dos veículos. A capacidade de cobrir grandes áreas com um baixo número de câmeras e a diminuição dos preços de dispositivos de aquisição de imagens e de computadores robustos são outras duas vantagens dessa metodologia (SAUNIER, SAYED, 2006).

Em contrapartida, problemas relacionados ao ajuste das câmeras, à área de cobertura e à transformação das imagens de três para duas dimensões (MAHMUD *et al.*, 2018) são ainda as principais restrições para obtenção de resultados precisos e totalmente confiáveis.

O rastreamento de objetos por vídeos possui quatro abordagens principais e uma outra, denominada abordagem híbrida, na qual tem-se a combinação entre qualquer duas abordagens dentre as quatro.

- Rastreamento Baseado em Modelo 3D: explora o conhecimento sobre os objetos comuns em uma determinada cena rodoviária e localiza e reconhece os veículos associando os dados da imagem a modelos projetados. Depende diretamente de modelos objetivos e geometricamente detalhados, o que é um grande empecilho devido à impossibilidade de se obter modelos detalhados para todos os tipos de veículos que podem vir a transitar na rodovia;
- Rastreamento Baseado na Região: identifica regiões conectadas nas imagens associadas a cada um dos veículos e as rastreia durante o tempo. É bem eficiente em tráfegos de fluxo livre, mas em congestionamentos os veículos passam a obstruir uns aos outros, o que acaba gerando apenas uma grande região como resultado da análise;
- Rastreamento Baseado no Contorno: determina uma representação do contorno do objeto e passa a atualizá-la constantemente. É mais eficiente que a abordagem anterior e reduz a complexidade computacional, porém a dificuldade de segmentar os veículos que estão obstruídos permanece;
- Rastreamento Baseado em Características: abandona a ideia de rastrear os objetos como um todo e passa a rastrear características, como pontos e linhas distinguíveis (isto é, cantos de janelas e bordas de para-choques, por exemplo). Apresenta grande vantagem em relação aos outros métodos porque, mesmo com a obstrução parcial, algumas características ainda estarão visíveis e passíveis de serem rastreadas. Entretanto, por mais que esse problema seja superado outro é criado: determinar quais características pertencem ao mesmo objeto e agrupá-las.

2.4.1. RASTREAMENTO BASEADO EM CARACTERÍSTICAS

Partindo do pressuposto de que as superfícies das rodovias são planas e que o movimento dos veículos é paralelo ao plano da rodovia, as coordenadas das características rastreadas podem ser determinadas por meio da relação entre as coordenadas da imagem e as coordenadas do mundo. Sendo assim, os dados de entrada do sistema são conjuntos de características rastreadas, ou seja, séries temporais de coordenadas, e o problema recai sobre o agrupamento destas para determinação e diferenciação dos objetos para posterior rastreamento de suas trajetórias.

Os objetos que estão se movendo possuem diversas características, dessa forma, o agrupamento das características é realizado principalmente pela restrição do movimento em comum ao longo da vida da trajetória. Ou seja, características que são vistas movendo-se rigidamente juntas são agrupadas. Assim, ao processar todas as características rastreadas durante um período de tempo, as características que estiverem próximas fisicamente e com velocidades semelhantes são agrupadas e esse grupo vai sendo segmentado em outros grupos a partir do movimento em comum.

Além disso, as características que possuírem vetores de movimento que diferem em mais do que um limite especificado, que pode variar de acordo com o programa/ algoritmo utilizado, são consideradas como não sendo pertencentes ao mesmo objeto (ou usuário da via) e não são agrupadas, independentemente de sua proximidade espacial (TAGELDIN; SAYED, 2016).

É importante, também, que o algoritmo utilizado consiga diferenciar as características dos usuários da via e as características que permanecem estacionárias e são parte do ambiente, isto é, do plano de fundo da situação que está sendo analisada (TAGELDIN; SAYED, 2015).

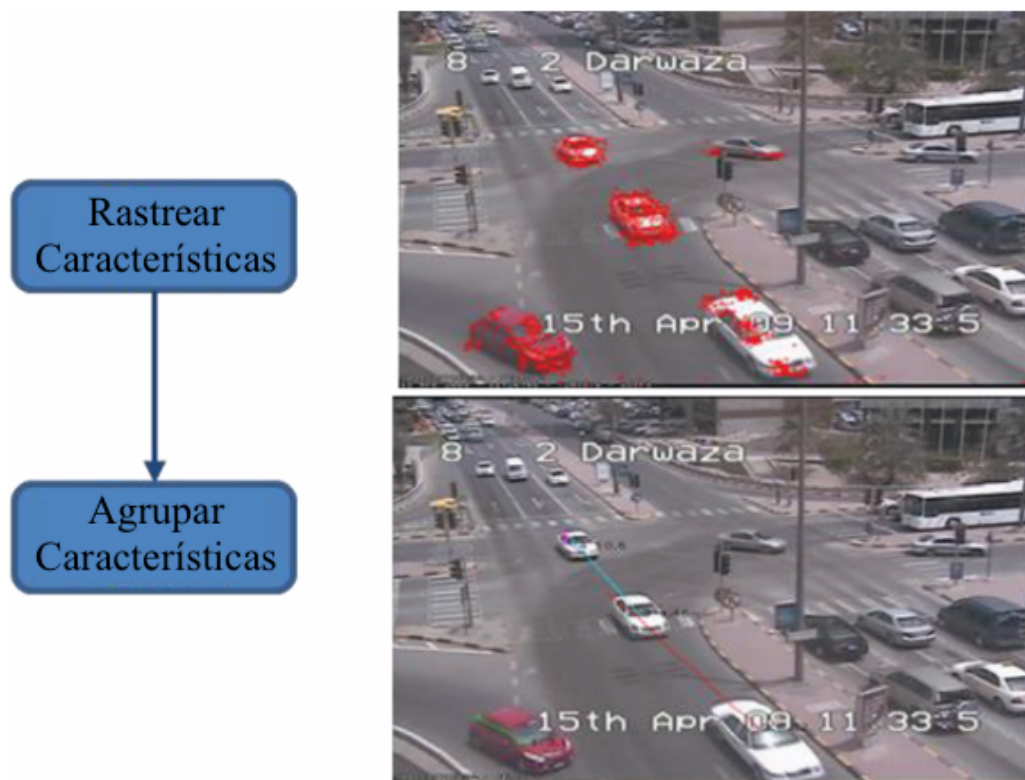


Figura 2.8: Etapas do rastreamento baseado em características

Fonte: ZAKI *et al.*, 2014, adaptado.

A utilização dessa técnica em interseções deve permitir a conexão entre as características independentemente de onde elas forem detectadas, isso porque essa detecção, bem como a perda do grupo de características, pode ocorrer em qualquer posição do campo de vista, uma vez que as interseções não possuem locais de saída e de entrada rigorosamente definidos.

A Figura 2.9 apresenta um resumo das etapas da análise dos vídeos pela técnica de visão computacional, bem como algumas avaliações dos resultados que podem ser feitas no contexto da segurança viária.

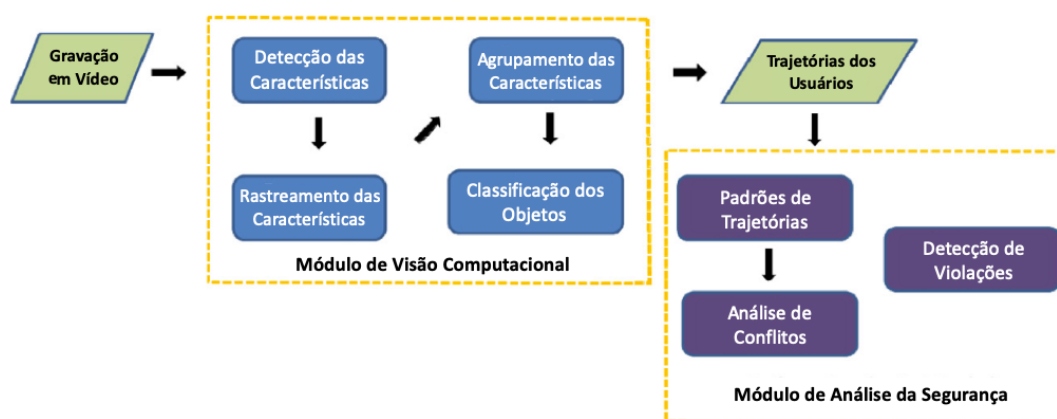


Figura 2.9: Fluxograma da Análise de Vídeo

Fonte: SAYED, ZAKI, AUTEY, 2013, adaptado.

Atualmente existem alguns programas que conseguem rastrear veículos e determinar suas trajetórias de forma simples e rápida. Um exemplo é o *Data From Sky* que, por meio do *TrafficSurvey*, permite aos usuários extrair informações como tipo de veículos (motorizados ou não), suas velocidades e trajetórias, bem como mapas de calor de velocidade e de aceleração da região observada.

O sistema do *Data From Sky* analisa e processa os vídeos em duas etapas: o georreferenciamento, que estabelece uma correspondência e um mapeamento entre a sequência de frames e as coordenadas reais do mundo; e a detecção, localização e rastreamento dos objetos de interesse.

O processo de georreferenciamento assume que a superfície da rodovia é plana e consiste em uma transformação linear do vídeo, que captura uma imagem tridimensional, para um espaço bidimensional. Essa transformação ocorre por meio de uma calibração da câmera e, em seguida,

pela seleção de, no mínimo, quatro pontos na imagem cujas posições exatas (latitude e longitude) são conhecidas e fornecidas pelo usuário. Assim, torna-se possível mapear um pixel da imagem e transformá-lo em uma coordenada real da interseção (ADAMEC *et al.*, 2020).

Já no que diz respeito à detecção e ao rastreamento dos objetos, o *Data From Sky*, primeiramente, registra toda a sequência do vídeo analisado em um espaço de referência comum e, depois, divide-o em segmentos (frames) de forma que seja mais fácil e rápido registrar as imagens associadas a tais segmentos. O processo de registro é separado em duas etapas, a de nível local e a de nível global, sendo que a primeira diz respeito a um registro rápido e contínuo da imagem que está em destaque (YANG *et al.*, 2021).

Para extrair as trajetórias dos objetos e refinar os resultados obtidos, a estimativa do rastreamento das características é realizada por meio do método Lucas-Kanade em conjunto com o algoritmo “*good features to track*”. O método mencionado permite o rastreamento de forma consistente de objetos em diferentes condições temporais e de luz (TAGELDIN; SAYED, 2016). Esse utiliza-se do gradiente de intensidade espacial das imagens para encontrar uma boa correspondência entre duas delas usando um tipo de iteração de Newton-Raphson (LUCAS; KANADE, 1981).

Já o algoritmo “*good features to track*” foi desenvolvido para ser um critério de seleção de características, de forma que as melhores características fossem escolhidas para serem rastreadas, facilitando o processo. Além disso, o algoritmo é um ótimo método de monitoramento da qualidade das características durante o rastreamento, que utiliza uma medida de dissimilaridade para quantificar a mudança de aparência de uma característica entre um frame e outro (SHI, 1994).

Os dados de movimentação e trajetória dos veículos, como velocidades e acelerações, são, em seguida, filtrados utilizando-se o Filtro de Kalman Estendido (EKF) com a intenção de minimizar as inconsistências e aumentar a precisão. Aqui, o registro global tem o objetivo de achar a relação entre o recém criado segmento de vídeo com o frame anterior por meio de um mecanismo de registro mais robusto, o GMS - Grid-Based Motion Statistics (YANG *et al.*, 2021). O GMS é uma formulação estatísticas que determina a correspondência de características entre diferentes frames por meio da quantidade de correspondências que são realizadas na vizinhança da característica em destaque (BIAN *et al.*, 2017).

3. DETERMINAÇÃO DOS CONFLITOS DE TRÁFEGO

A realização de uma análise correta e academicamente válida requer um embasamento teórico acerca da técnica de análise de conflitos e de seus desdobramentos no contexto da segurança viária. Tal fundamentação foi objeto de estudo dos primeiros dois itens deste trabalho.

Para continuidade e desenvolvimento do estudo, deve-se partir para a análise dos dados em questão, caracterizando-os, avaliando os resultados obtidos por meio da utilização do *Data From Sky* e determinando os conflitos de tráfego.

3.1. CARACTERIZAÇÃO DA INTERSEÇÃO E DOS DADOS

O vídeo utilizado foi gravado em uma interseção na cidade de Taguatinga, Distrito Federal, localizada no Km 75,7 da rodovia DF-001, também conhecida como Estrada Parque do Contorno (EPCT). A interseção é movimentada, principalmente devido ao shopping que está localizado nas adjacências. Além disso, as vizinhanças da interseção apresentam diversos prédios comerciais, residenciais e até hotéis. Há ainda um ponto de ônibus localizado poucos metros à direita fora do campo de visão da câmera. Esse cenário proporciona uma considerável variedade de usuários da via (carros, motos, ônibus, veículos pesados e pedestres). As Figura 3.1. e Figura 3.2 apresentam o *layout* da interseção e sua dinâmica de trânsito.



Figura 3.1: *Layout* da interseção pelo campo de visão da câmera – 1/2



Figura 3.2: *Layout da interseção pelo campo de visão da câmera – 2/2*

Foi analisada uma hora de vídeo, gravado no dia 06 de outubro de 2021 (quarta-feira) entre às 17h30 e 18h30. Foi utilizada uma câmera modelo AXIS P5635-E Mk II PTZ, com 1920 x 1080 pixels de resolução, instalada nas coordenadas 15° 50' 32,23" S e 48° 2' 44,83" O.

Por meio do software *Data From Sky*, foi possível extrair as trajetórias de todos os usuários da via, com veículos motorizados ou não. Cada objeto (ou pessoa) rastreado é identificado com um ID e com um tipo, que varia entre pedestre, carro, veículo médio, veículo pesado, ônibus, moto, bicicleta, caminhão leve e van.

Como a definição do vídeo é de 25 frames por segundo, a posição de cada objeto, sua velocidade atual e sua aceleração são registradas a cada 0,04 segundos. Os objetos são rastreados do momento em que o veículo, ou pessoa, começa a ser detectado na imagem, até o momento em que ele sai do campo de visão da câmera e sua trajetória é encerrada.

A Figura 3.3 apresenta o rastreamento das trajetórias, com destaque para a 754, cuja posição nesse determinado tempo t do vídeo é exibida. Salienta-se que as trajetórias são apresentadas na cor verde quando o objeto já passou por essas posições e em azul quando ainda será percorrida.

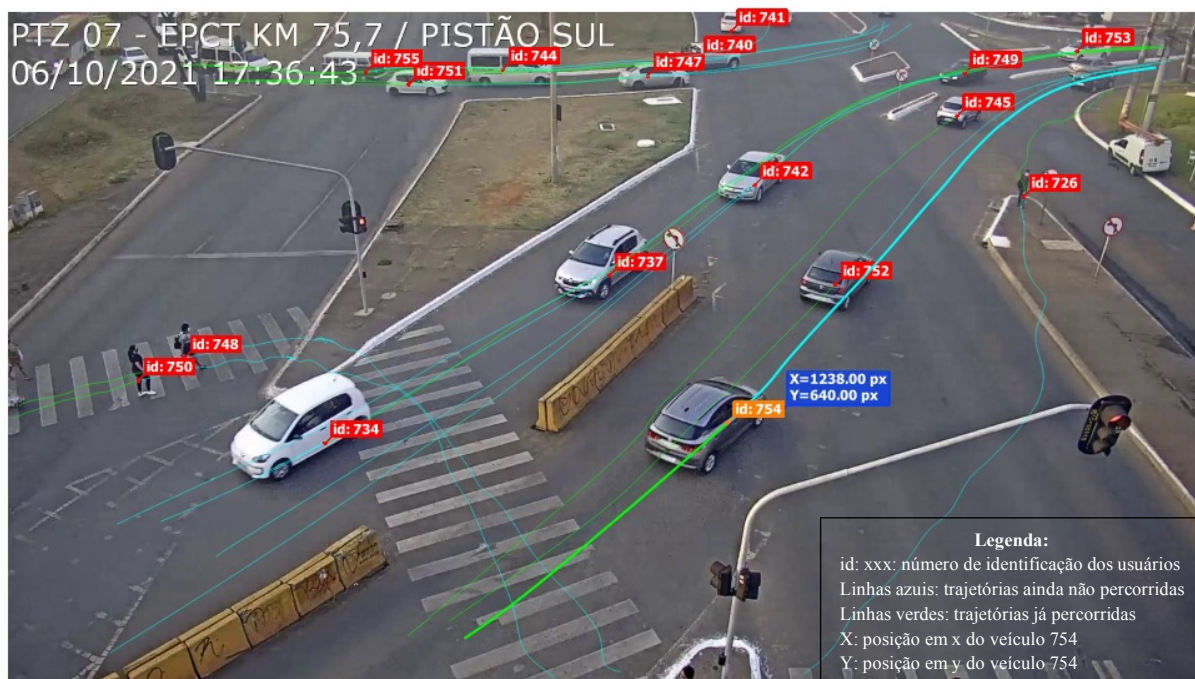


Figura 3.3: Rastreamento das trajetórias pelo *Data From Sky*

3.2. TRAJETÓRIAS DOS VEÍCULOS

Durante a análise do vídeo, verificou-se que o trânsito na interseção era bastante organizado, com o fluxo de veículos bem definido. Situações como o avanço do sinal vermelho tampouco foram observadas. Dessa forma, ao analisar possíveis conflitos de tráfego não haveria necessidade de avaliar a relação entre as trajetórias 734 e 754 (Figura 3.3), por exemplo, porque um conflito nunca seria observado.

Para solucionar esse problema foram definidos *gates*, de entrada e de saída, o que estabeleceu trechos na interseção. As trajetórias somente seriam detectadas e analisadas se estivessem entre esses *gates*. A Figura 3.4 mostra os 12 *gates* (seis de entrada e seis de saídas) definidos neste estudo, sendo que os trechos são, justamente, o trajeto entre as entradas e saídas de mesmo número.

Assim, as trajetórias rastreadas poderiam ser divididas de acordo com os seis trechos. Desta forma, veículos que entrassem pela Entrada1 e saíssem pela Saída1, por exemplo, configurariam trajetórias do Trecho 1. Em seguida, o indicador de conflito seria calculado utilizando apenas trajetórias do mesmo trecho.



Figura 3.4: Definição dos *gates* de entrada e saída

O rastreamento resultou em 6.668 objetos rastreados, sendo 5.137 carros, 12 veículos pesados, 117 ônibus, 456 motos, 167 bicicletas, 636 pedestres, 92 caminhões leves e 51 vans. Entretanto, entre essas trajetórias, foram identificados alguns erros: (1) trajetórias que não correspondiam a veículos; (2) trajetórias que começaram rastreando um objeto, perderam a referência das características e passaram a rastrear outro objeto; (3) trajetórias que só rastrearam segmentos insignificantes da trajetória real; e (4) trajetórias que, mesmo com IDs diferentes, foram originadas por um único veículo.

Sendo assim, a partir do relatório gerado pelo *Data From Sky* com os objetos rastreados em função dos *gates* de entrada e saída, foram analisadas principalmente as trajetórias que estavam determinadas como sem entrada ou saída. Com essas trajetórias, foi possível determinar as trajetórias realmente válidas e que seriam utilizadas para calcular o indicador de conflito. A quantidade de trajetórias em função do tipo para cada um dos trechos é apresentada pela Tabela 3.1. Cabe destacar que pedestres e ciclistas não foram considerados nesta análise.

Tabela 3.1: Veículos rastreados em função do tipo para cada trecho

Trechos	Carros	Veículos Pesados	Ônibus	Motos	Caminhões Leves	Vans	Total
Trecho 1	464	1	8	87	31	20	611
Trecho 2	1.460	10	2	94	34	8	1.608
Trecho 3	544	1	61	12	1	3	622
Trecho 4	1.022	0	9	119	3	3	1156
Trecho 5	1.173	0	1	97	3	2	1.276
Trecho 6	104	0	2	17	3	10	136
Total	4.767	12	83	426	75	46	5.409

3.3. CÁLCULO DO *TIME TO COLLISION* (TTC)

Com o objetivo de determinar os conflitos de tráfego presentes na interseção, procedeu-se com o cálculo de um dos indicadores temporais mais utilizados, o *Time to Collision* (TTC). Diversos estudos comprovam sua eficiência em caracterizar os conflitos, além de possuir uma forma de cálculo já bem definida e de fácil aplicação.

Como mencionado anteriormente, o *Time to Collision* (TTC) é o tempo esperado para que dois veículos se choquem se suas trajetórias permanecerem inalteradas, podendo ser calculado por meio da Equação 2.1. Entretanto, a partir dos dados obtidos pelo rastreamento dos veículos, optou-se por calcular o *Time to Collision* para o caso mais geral do movimento bidimensional, como é apresentado por Ward *et al.* (2015).

Os autores consideram dois veículos que possuem vetores de posição, velocidade e aceleração como p_i , p_j , v_i , v_j , a_i e a_j , respectivamente. Assim, a distância entre os veículos d_{ij} é descrita pela Equação 3.1, enquanto suas primeira e segunda derivadas são determinadas pelas Equação 3.2 e Equação 3.3, respectivamente.

$$d_{ij} = \sqrt{(p_i - p_j)^T (p_i - p_j)} \quad (3.1)$$

$$\dot{d}_{ij} = \frac{1}{d_{ij}} (p_i - p_j)^T (v_i - v_j) \quad (3.2)$$

$$\ddot{d}_{ij} = \frac{1}{d_{ij}} \left((v_i - v_j)^T (v_i - v_j) - \dot{d}_{ij}^2 \right) \quad (3.3)$$

A partir dessas, o *Time To Collision* pode ser calculado de acordo com a Equação 3.4, na qual $\Delta = \dot{d}_{ij}^2 - 2\ddot{d}_{ij}d_{ij}$.

$$TTC = \begin{cases} -\frac{d_{ij}}{\dot{d}_{ij}} & \text{se } \ddot{d}_{ij} = 0 \\ \frac{\dot{d}_{ij}}{\ddot{d}_{ij}} & \text{se } \Delta < 0 \\ \min\left(\frac{-\dot{d}_{ij} \pm \sqrt{\Delta}}{\ddot{d}_{ij}}\right) & \text{se } \min\left(\frac{-\dot{d}_{ij} \pm \sqrt{\Delta}}{\ddot{d}_{ij}}\right) \geq 0 \\ \max\left(\frac{-\dot{d}_{ij} \pm \sqrt{\Delta}}{\ddot{d}_{ij}}\right) & \text{se } \min\left(\frac{-\dot{d}_{ij} \pm \sqrt{\Delta}}{\ddot{d}_{ij}}\right) < 0 \end{cases} \quad (3.4)$$

Quando Δ é negativo, não existem raízes reais, então o TTC é definido como o tempo de aproximação mais próximo. No caso de Δ igual a zero ou positivo, duas raízes reais serão determinadas: quando ambas são positivas, adota-se o menor valor por ser o primeiro momento no qual os veículos vão colidir; quando uma é positiva e a outra é negativa, toma-se o valor positivo por representar a colisão no futuro; por fim, quando ambas são negativas, o indicador é igual à raiz de menor valor absoluto por essa representar a interação mais recente entre os veículos (WARD, *et al.*, 2015).

A fim de determinar o vetor velocidade, cada valor de velocidade absoluta obtido pelo *software*, para cada frame, é decomposto em uma velocidade na direção do eixo x e uma na direção do eixo y. O ângulo utilizado é definido pela diferença entre a posição atual do veículo e a anterior. No que concerne à posição dos veículos, o *software* já determina a posição em x e em y para cada frame. Com a obtenção dessas velocidades, cada um dos seis trechos passou a apresentar uma lista de veículos com valores de posição e velocidade, ambos em x e y, a cada 0,04 s, pelo tempo em que a trajetória fosse rastreada.

Analisando um par de veículos, caso ambos possuísem valores de posição e velocidade para o mesmo tempo t , a Equação 3.4 seria aplicada para determinar o TTC nessa interação. Esse procedimento foi realizado por meio de uma programação em VBA (*Visual Basic for Applications*), de forma que todas as possíveis interações entre quaisquer dois veículos, em cada trecho, fossem testadas. Assim, quando houvesse dois tempos iguais, o indicador poderia ser calculado.

Um último ponto importante no que concerne ao cálculo do indicador TTC diz respeito às unidades de medida. Como não foi possível realizar o georreferenciamento do vídeo, as posições foram obtidas em pixels (px) enquanto as velocidades em kilo-pixels por hora (kpx/h). Assim, o resultado da Equação 3.4 deve ser multiplicado por 3,6 para que se tenha o valor de *Time To Collision* em segundos.

O valor do TTC é infinito se os veículos não estão em uma rota de colisão, caso contrário, o valor é finito e decresce com o tempo. O TTC mínimo que é atingido à medida que os veículos se aproximam é considerado uma medida crítica na estimativa da gravidade do conflito (SAYED; ZEIN, 1999). O limite para identificação dos conflitos é comumente adotado como sendo 3 segundos (TAGELDIN; SAYED, 2016).

Considerando tal limite, após os cálculos de TTC, todas as interações que obtiveram valores menores que 3 segundos foram observadas no vídeo para que se tivesse a confirmação, ou não, de que se tratavam de conflitos. Dessa forma, 52 interações foram determinadas como sendo conflitos de tráfego.

Analisando cada uma dessas situações, verificou-se que a grande maioria dessas se deu porque o veículo da frente realizou uma frenagem não esperada, obrigando o veículo traseiro a também frear ou a desviar (conflitos de colisão traseira). Além disso, no Trecho 3, os conflitos ocorreram devido à curva à direita. Assim, algumas vezes quando o veículo dianteiro realizava a conversão, o traseiro precisava frear para evitar a colisão.

A Figura 3.5 exemplifica o conflito de colisão traseira, sendo apresentados os perfis de velocidade de ambos os veículos envolvidos na Figura 3.6.

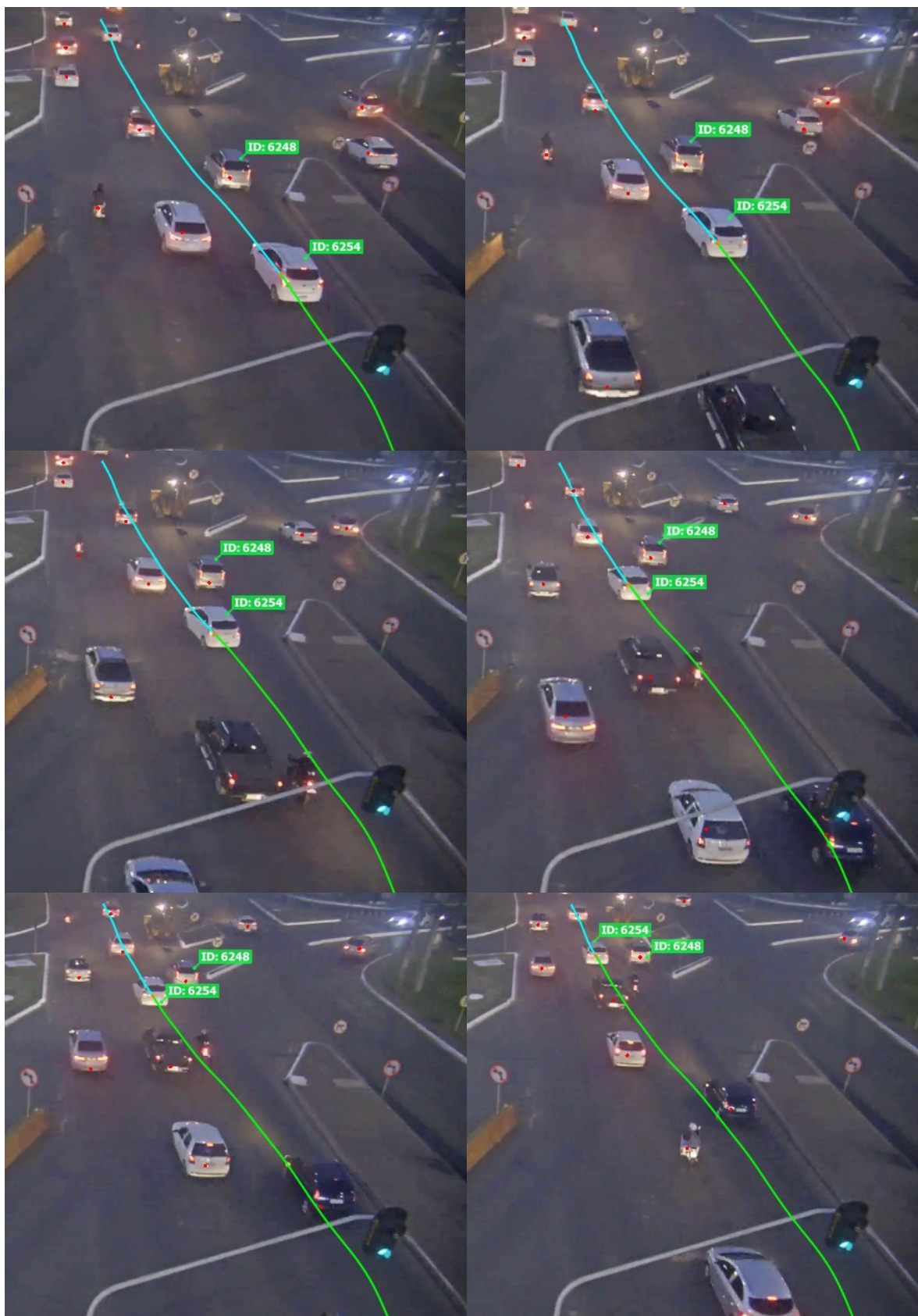
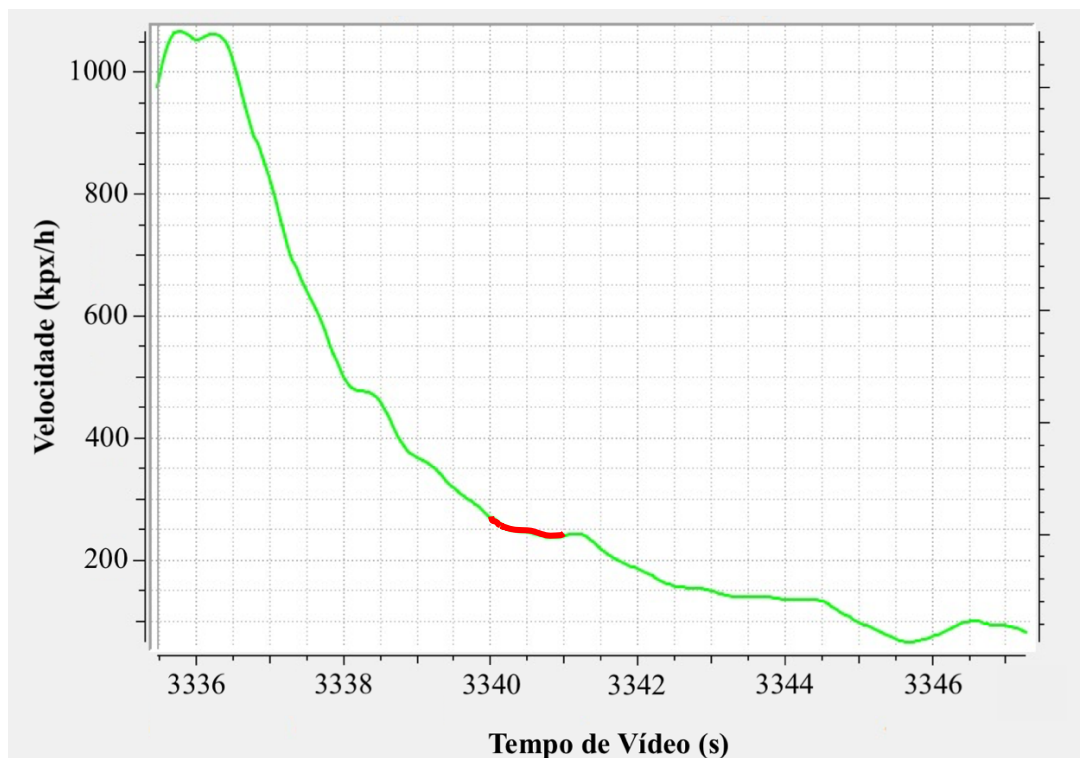


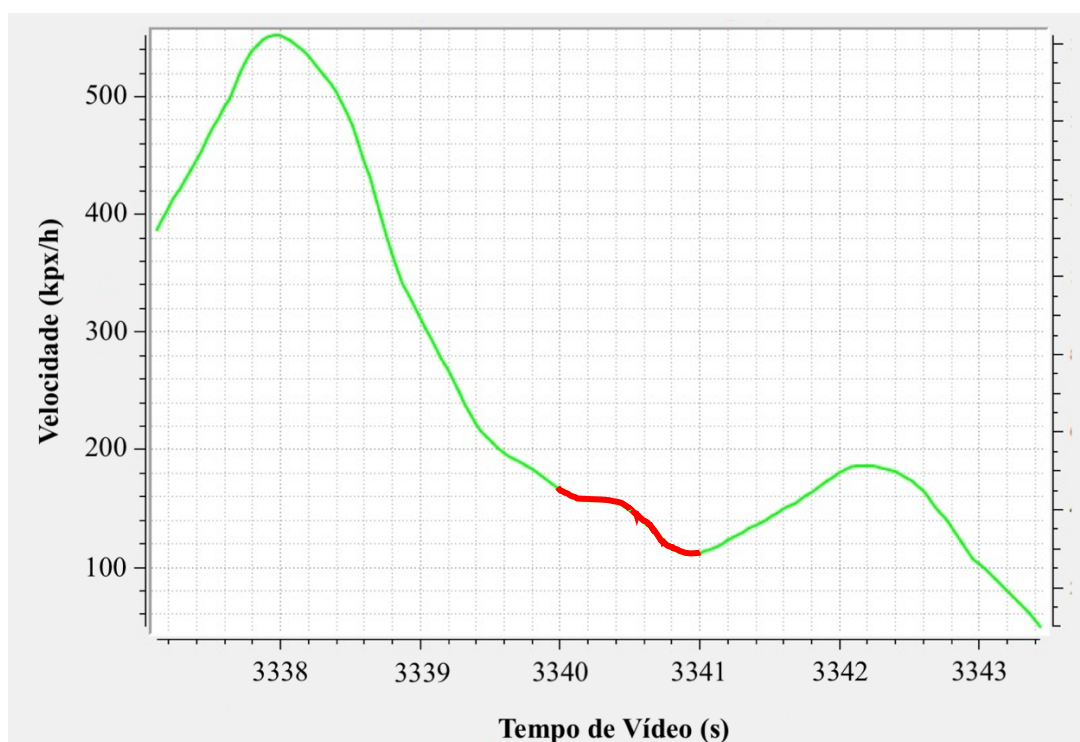
Figura 3.5: Exemplificação dos conflitos de colisão traseira observados

Fonte: DATA FROM SKY, 2021, adaptado



(a) Perfil de Velocidade do Veículo 6248

Fonte: DATA FROM SKY, 2021, adaptado



(b) Perfil de Velocidade do Veículo 6254

Fonte: DATA FROM SKY, 2021, adaptado

Figura 3.6: Perfis de velocidade dos veículos 6248 e 6254, nos quais as linhas em vermelho representam o momento em que o TTC é menor que o limite de 3 segundos

As Figura 3.5 e Figura 3.6 permitem verificar que o veículo 6248 começa a diminuir sua velocidade a partir de 3336,5 segundos de vídeo, aproximadamente, o que obriga o veículo 6254 a também diminuir sua velocidade. Esse cenário no qual ambos os veículos estão desacelerando encontra seu limite entre os segundos 3340 e 3341 de vídeo. Nesse momento, o *Time To Collision* (TTC) entre os dois veículos é aproximadamente igual a 2, o que indica uma quase-colisão, que não ocorre devido à mudança de faixa realizada pelo veículo 6254. Essa mudança pode ser verificada pelo aumento de velocidade após o tempo $t = 3341s$, que indica que o veículo já não mais se encontra atrás do 6248 e pode desenvolver uma maior velocidade.

O perfil do *Time To Collision* (TTC) correspondente ao conflito é apresentado pela Figura 3.7, que demonstra como o valor do indicador vai diminuindo à medida que os veículos estão se aproximando, encontra seu mínimo entre os tempos 3340s e 3341s, como mencionado, e tende ao infinito depois que ocorre a mudança de faixa, visto que agora os veículos não estão mais em rota de colisão.

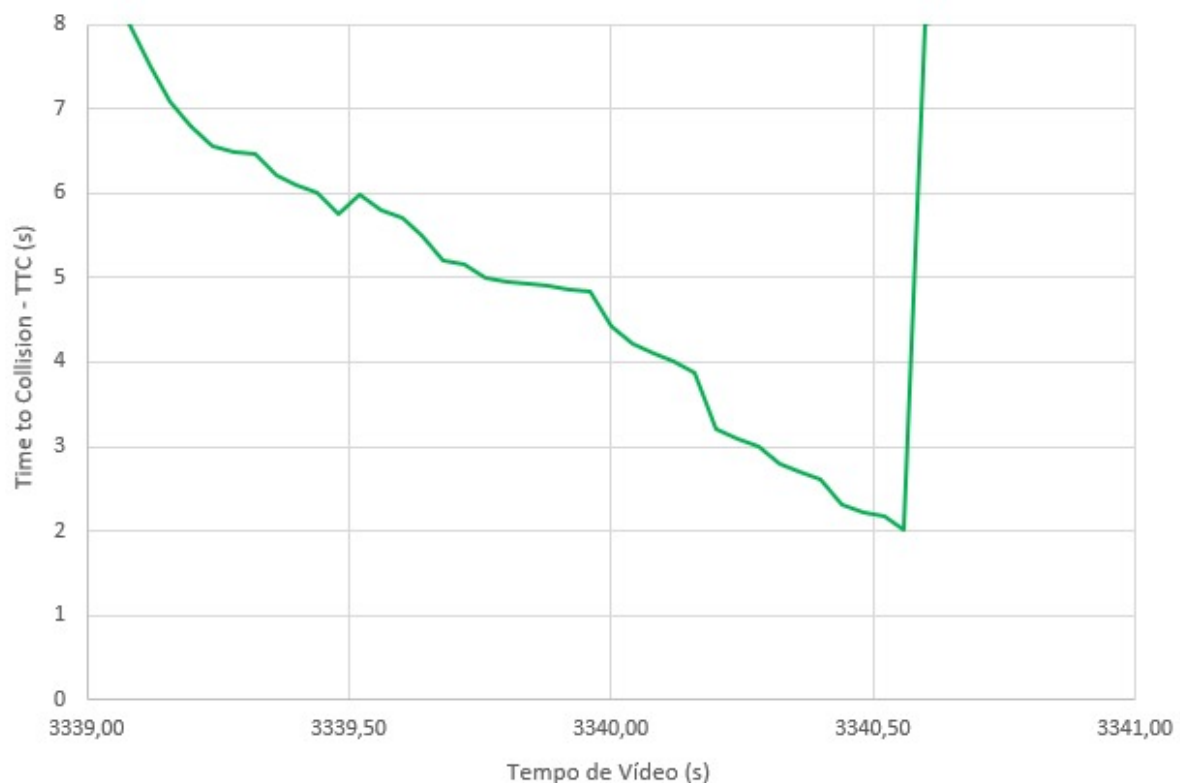


Figura 3.7: Perfil do *Time To Collision* (TTC) correspondente ao conflito de colisão traseira

A Figura 3.8 ilustra o conflito devido à curva à direita, enquanto a Figura 3.9 apresenta os perfis de velocidade dos veículos envolvidos em tal.

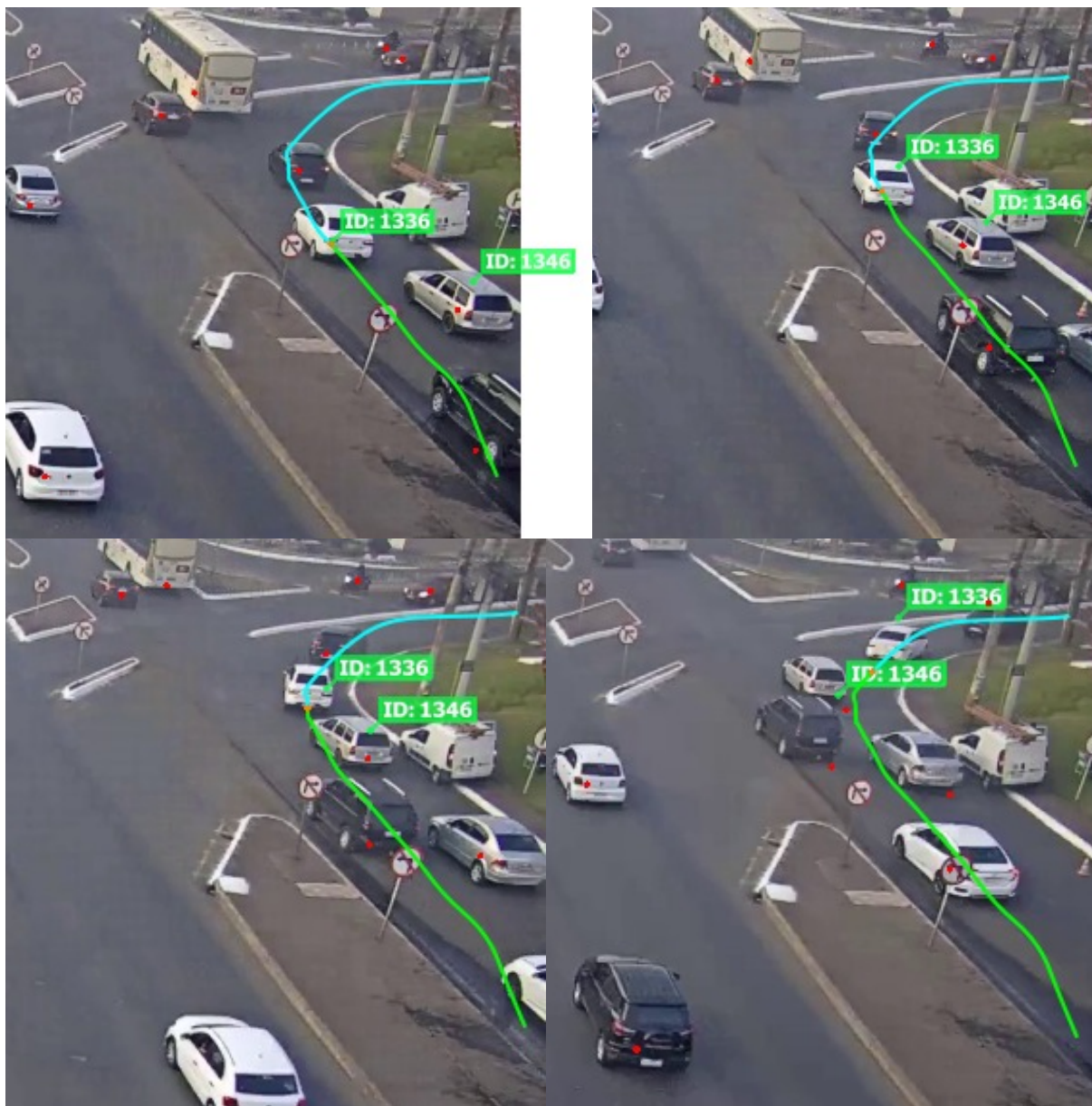
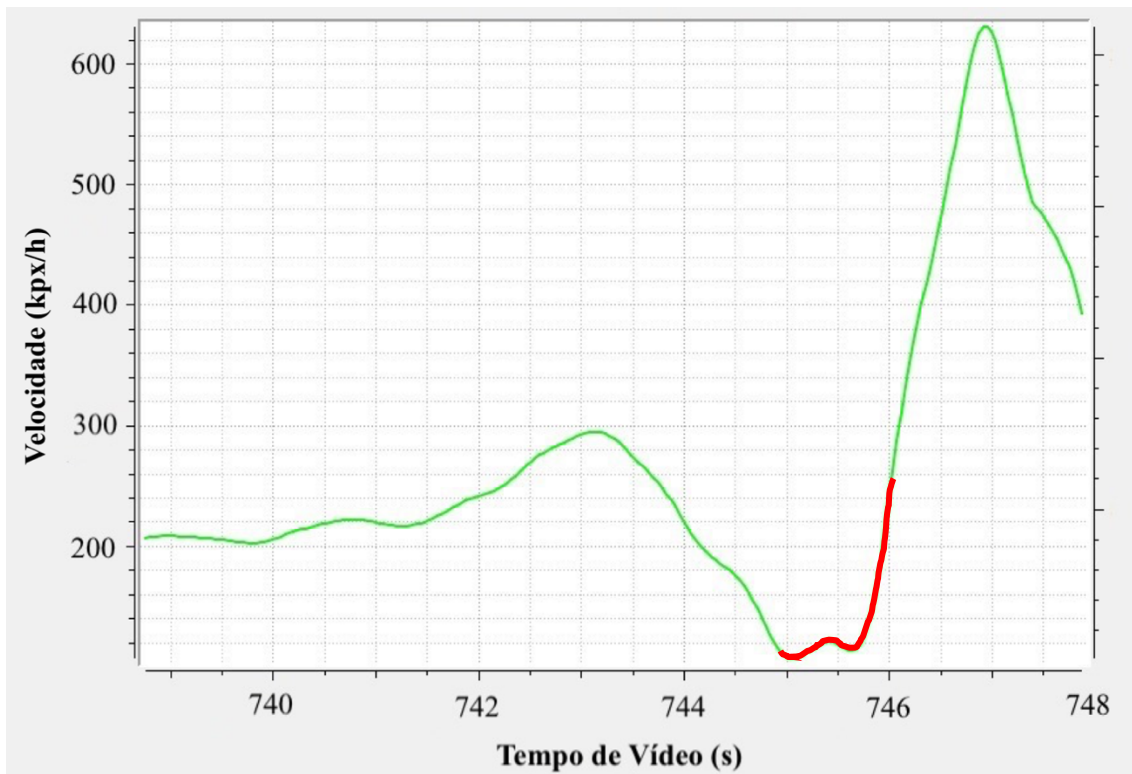


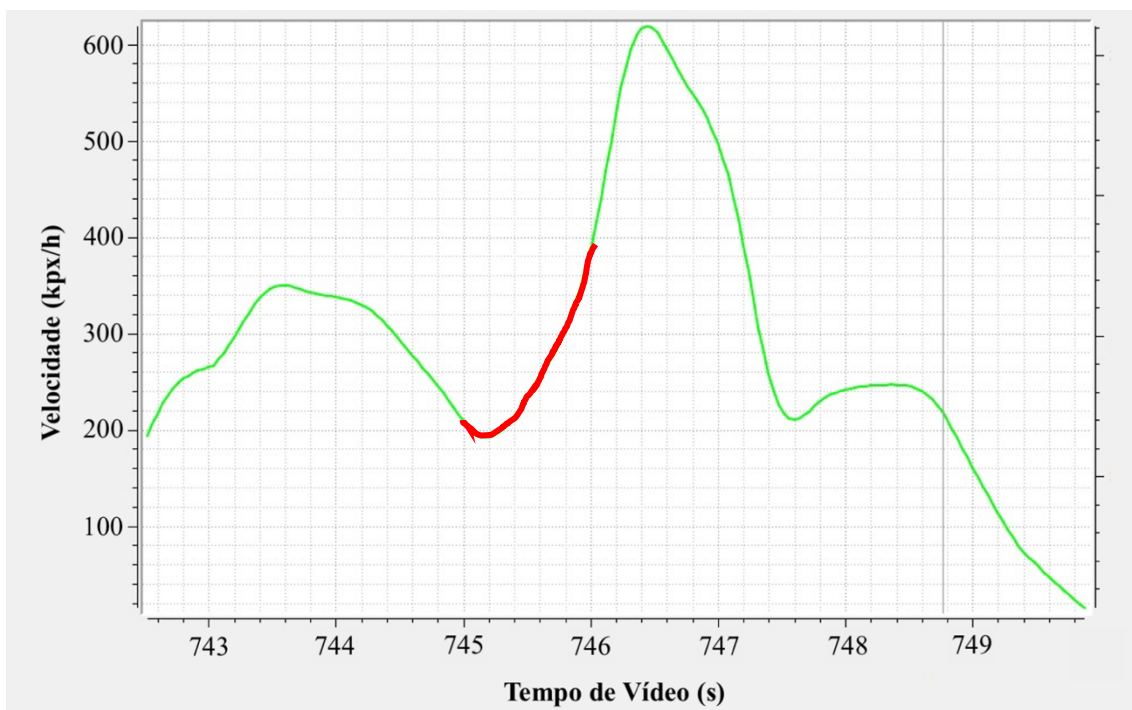
Figura 3.8: Exemplificação dos conflitos devido à curva à direita observados

Fonte: DATA FROM SKY, 2021, adaptado



(a) Perfil de Velocidade do Veículo 1336

Fonte: DATA FROM SKY, 2021, adaptado



(b) Perfil de Velocidade do Veículo 1346

Fonte: DATA FROM SKY, 2021, adaptado

Figura 3.9: Perfis de velocidade dos veículos 1336 e 1346, nos quais as linhas em vermelho representam o momento em que o TTC é menor que o limite de 3 segundos

As Figura 3.8 e Figura 3.9 permitem verificar que o veículo 1336 começa a diminuir sua velocidade um pouco após 743 segundos de vídeo com o intuito de realizar a curva à direita, o que faz com que, logo em seguida, o veículo 1346 seja obrigado a desacelerar. Essa situação faz com que os veículos passem a se aproximar, atingindo um limite entre os segundos 745 e 746 de vídeo. Nesse momento, o *Time To Collision* (TTC) entre os dois é aproximadamente igual a 1,8, o que indica uma quase-colisão. Depois que o veículo 1336 realiza a curva, no tempo $t = 746s$, as velocidades de ambos os veículos são consideravelmente aumentadas, visto que não há mais uma situação de conflito e os dois possuem trajetórias livres para percorrer.

O perfil do *Time To Collision* (TTC) correspondente ao conflito descrito é apresentado pela Figura 3.10, que, assim como no caso do conflito por colisão traseira, demonstra como o valor do indicador vai diminuindo à medida que os veículos estão se aproximando, encontrando seu mínimo um pouco antes do tempo de vídeo igual a 746s e tendendo ao infinito assim que o veículo dianteiro realiza a curva, visto que agora os veículos não estão mais em rota de colisão.

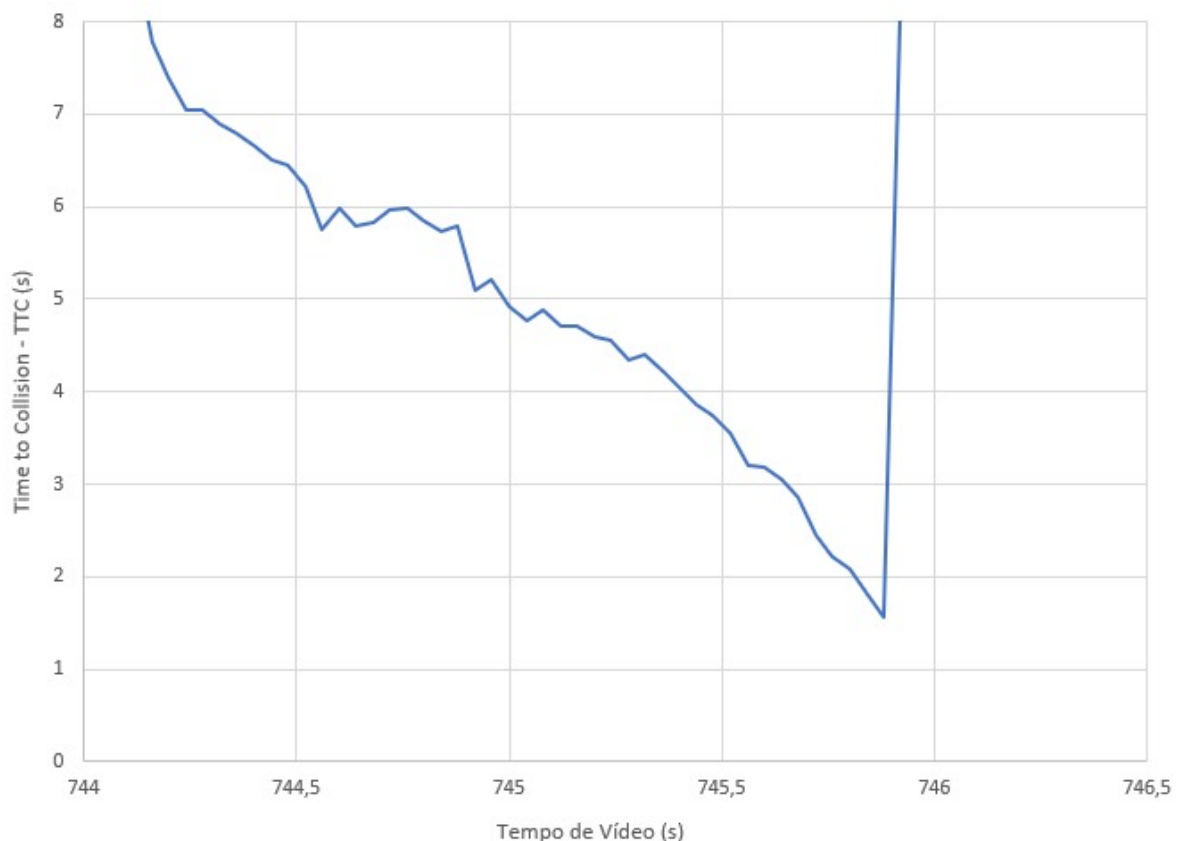


Figura 3.10: Perfil do *Time To Collision* (TTC) correspondente ao conflito devido à curva à direita

Por fim, é possível acrescentar que comparando-se os dois perfis apresentados, o conflito devido à curva à direita seria mais grave e estaria mais próximo de ocasionar o sinistro de trânsito, visto que o valor mínimo de TCC encontrado para esse caso foi menor que o encontrado para o conflito de colisão traseira.

4. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

4.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Na abordagem tradicional, a análise da segurança viária de uma interseção é realizada utilizando métodos reativos que se baseiam em dados dos sinistros contabilizados na região e na observação subjetiva de especialistas, como ressaltado anteriormente. Focando-se no cenário brasileiro, a utilização de métodos que fogem dessa abordagem tradicional é praticamente inexistente. Nesse contexto, foi proposta a Técnica de Análise de Conflitos como uma forma proativa e mais objetiva de se avaliar a segurança de uma interseção. Para isso, foi empregado o rastreamento dos veículos por meio da visão computacional.

O rastreamento dos veículos realizado pelo programa *Data From Sky* foi muito eficiente, resultando em, aproximadamente, 92% dos veículos (desconsiderando pedestres e ciclistas) rastreados corretamente. Essa alta porcentagem indica que a utilização da visão computacional para analisar sistemas de tráfego e obter informações sobre as trajetórias dos veículos já está amplamente desenvolvida e difundida e deve ser mais explorada para analisar as vias brasileiras.

Além disso, tem-se que a detecção dos veículos por meio do rastreamento de características também se mostra como uma tecnologia eficiente e que pode continuar sendo adotada em *softwares* e algoritmos com o objetivo de determinar conflitos de tráfego. Um exemplo é o algoritmo em código aberto desenvolvido por Nicolas Saunier, *Traffic Intelligence* (<https://bitbucket.org/Nicolas/trafficintelligence/src/master/>), que já apresentou diversos resultados satisfatórios e que continua a ser melhorado e aperfeiçoado.

A metodologia para obtenção do indicador de conflito apresentada no capítulo 3 foi satisfatória, visto que os resultados encontrados estavam de acordo com a realidade. O vídeo analisado

apresenta uma interseção organizada e sinalizada, na qual não são observadas transgressões acentuadas no trânsito, como o avanço do sinal vermelho, por exemplo. É possível pontuar, também, que não são notadas muitas mudanças de faixas pelos veículos, situação que poderia gerar diversos conflitos. Sendo assim, o número pequeno de conflitos de tráfego encontrados durante a hora de vídeo analisada representa o tráfego da região e já era esperado.

A utilização de softwares como o *Data From Sky* para determinar as trajetórias dos veículos em uma interseção é uma ótima ferramenta para buscar por uma análise mais proativa da segurança viária. Entretanto, essas ferramentas e os estudos que são realizados com os dados obtidos devem ser mais aperfeiçoados e explorados para a realidade brasileira.

No trabalho em questão, utilizou-se o TTC com um limite de 3 segundos por esse ser um indicador já amplamente utilizado. Contudo, é importante avaliar quais os melhores indicadores a serem adotados: quais conseguem caracterizar melhor os conflitos mais comuns nas vias brasileiras, bem como definir os valores de limites mais condizentes.

Finalmente, é importante pontuar o potencial dos resultados obtidos no que concerne à segurança viária. No estudo em questão constatou-se que a maioria dos conflitos ocorreram devido à curva à direita, como é apresentado pela

Figura 3.8. A identificação desse ponto específico pode indicar, por exemplo, uma falha de *design* da via, o que permite que seja realizado um estudo mais direcionado e, consequente, mais eficiente sobre a interseção com o intuito de melhorar sua segurança.

Essa análise, ao ser expandida para situações nas quais as interseções possuem mais pontos “problemáticos”, pode fazer com que investigações complexas, que levariam em consideração todo o cenário da interseção, passem a ser mais específicas e detalhadas, por examinarem apenas tais pontos. Tal conjuntura é extremamente benéfica para identificar com maior precisão e rapidez quais as melhores medidas a serem tomadas para aprimorar a segurança viária do local, seja com relação ao *design* da via, às sinalizações vertical e horizontal e até mesmo ao implemento de novas tecnologias mais robustas.

4.2. CUMPRIMENTO DOS OBJETIVOS

Este trabalho possuía um objetivo geral e três objetivos específicos que foram devidamente cumpridos.

Foi realizada uma revisão bibliográfica a respeito do desenvolvimento da Técnica de Análise de Conflitos e das principais maneiras de se contabilizar e identificar tais conflitos. Foram pontuados alguns aspectos sobre a utilização da visão computacional, em especial do rastreamento baseado em características, para esclarecer a importância dessa tecnologia no que tange à determinação de conflitos de tráfego, bem como para gerar maior entendimento sobre o funcionamento do *Data From Sky*.

Dessa maneira, a partir de uma hora de vídeo de uma interseção de Taguatinga – DF, foi possível determinar as trajetórias e as velocidades dos veículos e utilizar esses dados para calcular o indicador *Time To Collision* (TTC). Assim, foi possível identificar os conflitos existentes na interseção, sendo que os resultados obtidos estavam em consonância com o esperado.

Esses resultados corroboram com a perspectiva de que a utilização de medidas proativas para análise da segurança viária é absolutamente benéfica e deve ser mais explorada pelos órgãos competentes no contexto brasileiro.

4.3. SUGESTÕES DE ESTUDOS FUTUROS

A extensa revisão bibliográfica realizada para este trabalho verificou a escassez de estudos sobre medidas proativas e, conseqüentemente, sobre a técnica de análise de conflitos, no cenário brasileiro. Sendo assim, é possível citar algumas sugestões de estudos futuros que devem possibilitar o aprimoramento e a disseminação do estudo dos conflitos de tráfego no Brasil, visando a melhoria da segurança viária como um todo.

- Análise de outros programas/algoritmos de rastreamento de veículos que possuam seus resultados mais voltados para a detecção de conflitos de tráfego, como o código de Saunier, já mencionado;
- Com relação ao *Data From Sky*, esse oferece uma análise mais precisa (*Aerial*) quando os vídeos são gravados de uma vista aérea (utilizando drones, por exemplo), o que possibilita o georreferenciamento automático da imagem. A partir do georreferenciamento o próprio programa consegue calcular alguns conflitos de tráfego, como o TTC e o PET, o que pode ser uma ferramenta muito interessante para melhor análise dos principais tipos de conflitos encontrados nas vias brasileiras;
- Análise de outros tipos de interseções que possam apresentar maior quantidade de conflitos, como interseções não sinalizadas, por exemplo;
- Utilização de outros indicadores para determinação dos conflitos;
- Utilizar dados de trajetórias de pedestre e ciclistas para uma análise mais completa de todo o sistema viário da localidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAMEC, V.; HERMAN, D.; SCHULLEROVA, B.; URBANEK, M. (2020) **Modelling of Traffic Load by the DataFromSky System in the Smart City Concept**. Smart Governance for Cities: Perspectives and Experiences, Chapter 7.

ALLEN, B. L.; SHIN, B. T.; COOPER, P. J. (1978) **Analysis of traffic conflicts and collisions**.

ALMQVIST, S.; HYDÉN, C. (1994) **Methods for assessing traffic safety in developing countries**. Lund University, Lund Centre for Habitat Studies.

ARUN, A.; HAQUE, MD. M.; BHASKAR, A.; WASHINGTON, S.; SAYED, T. (2021) **A systematic mapping review of surrogate safety assessment using traffic conflict techniques**. Accident Analysis & Prevention, v. 153, p. 106016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10697: Pesquisa de sinistros de trânsito – Terminologia**. Rio de Janeiro, p. 01. 2020.

BERHELOT, A.; TAMKE, A.; DANG, T.; BREUEL, G. (2012) **A novel approach for the probabilistic computation of Time-To-Collision**. Intelligent Vehicles Symposium, Alcalá de Henares, Spain.

BEYMER, D.; MCLAUCHAN, P.; COIFMAN, B.; MALIK, J. (1997) **A real-time computer vision system for measuring traffic parameters**. Proceedings of IEEE computer society conference on computer vision and pattern recognition. IEEE. p. 495-501.

CAFISO, S.; DI GRAZIANO, A.; PAPPALARDO, G. (2017) **In-vehicle stereo vision system for identification of traffic conflicts between bus and pedestrian**. Journal of traffic and transportation engineering (English edition), v. 4, n. 1, p. 3-13.

CAO, X.; YOUNG, W.; SARVI, M.; AGHABAYK, K. (2014) **Automatic discrimination of traffic conflicts during lane changing manoeuvres**. ARRB Conference, 26th, 2014, Sydney, New South Wales, Australia.

CHAN, C. Y. (2006) **Definig Safety Performance Measures of Driver-Assistance Systems for Intersection Left-Turn Conflicts**. Intelligent Vehicles Symposium, Junho 13-15, Tóquio, Japão.

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

DATA FROM SKY (2021) Disponível em: <<https://datafromsky.com/>>. Acesso em: 18 set. 2021.

DAVIS, G. A.; HOURDOS, J.; XIONG, H.; CHATTERJEE, I. (2011) **Outline for a causal model of traffic conflicts and crashes**. Accident Analysis & Prevention, v. 43, n. 6, p. 1907-1919.

DEBNATH, A. K., WILSON, A., HAWORTH, N. (2014) **Proactive safety assessment in roadwork zones: a synthesis of surrogate measures of safety**. Proceedings of the 2014 Occupational Safety in Transport Conference, 18-19 September, Gold Coast, Australia.

EL-BASYOUNY, K.; SAYED, T. (2013) **Safety performance functions using traffic conflicts**. Safety science, v. 51, n. 1, p. 160-164.

GETTMAN, D.; HEAD, L. (2003) **Surrogate Safety Measures From Traffic Simulation Models, Final Report**. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Research, Development and Technology.

GUO, Y.; SAYED, T.; ZAKI, M. H. (2018) **Exploring evasive action-based indicators for PTW conflicts in shared traffic facility environments**. Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems, v. 144, n. 11, p. 04018065.

HYDÉN, C. (1987) **The development of a method for traffic safety evaluation: The Swedish Traffic Conflicts Technique.** Bulletin Lund Institute of Technology, Department, n. 70.

ISHAK, S.; QI, Y.; RAYAPROLU, P. (2012) **Safety Evaluation of Joint and Conventional Lane Merge Configurations for Freeway Work Zones.** Traffic Injury Prevention, 13:2, 199-208.

JONASSON, J. K.; ROOTZÉN, H. (2014) **Internal validation of near-crashes in naturalistic driving studies: A continuous and multivariate approach.** Accident Analysis & Prevention, v. 62, p. 102-109.

KUSUMASTUTIE, N. S.; RUSMANDANI, P. (2019) **A brief review: traffic conflict techniques and the challenges of the studies in Indonesia.** MATEC Web of Conferences. EDP Sciences, p. 03004.

LU, G.; CHENG B.; KUZUMAKI, S.; MEI B. (2011) **Relationship between road traffic accidents and conflicts recorded by drive recorders.** Traffic injury prevention, v. 12, n. 4, p. 320-326.

LU, G.; LIU, M.; WANG, Y.; YU, G. (2012) **Quantifying the severity of traffic conflict by assuming moving elements as rectangles at intersection.** Procedia-Social and Behavioral Sciences, v. 43, p. 255-264.

LUCAS, B. D.; KANADE, T. (1981) **An Iterative Image Registration Technique with an Application to Stereo Vision.** IJCAI, p. 674-679, British Columbia, Vancouver.

MAHMUD, S. M.; FERREIRA, L.; HOQUE, MD. S.; TAVASSOLI A. (2018) **Reviewing traffic conflict techniques for potential application to developing countries.** Journal of Engineering Science and Technology, v. 13, n. 6, p. 1869-1890.

MINDERHOUD, M. M.; BOVY, P. H. L. (2001) **Extended time-to-collision measures for road traffic safety assessment.** Accident Analysis e Prevation, v 33, p. 89-97.

NODARI, C. T.; LINDAU, L. A. (2001) **Auditoria da segurança viária**. TRANSPORTES, v. 9, n. 2.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE – OMS (2021) **Road traffic injuries**. Página oficial da Organização. Disponível em: <https://www.who.int/health-topics/road-safety#tab=tab_1>. Acesso em: 30 abr. 2021.

PARKER JR, M. R.; ZEGEER, C. V. (1989) **Traffic conflict techniques for safety and operations: Observers manual**. Federal Highway Administration. United States.

PERKINS, S. R.; HARRIS, J. L. (1968) **Traffic conflict characteristics - Accident potential at intersections**. Highway Research Record, n. 225.

PERKINS, D. (1981). **Highway Safety Evaluation Procedural Guide**. FHWA, Rept. FHWA-TS-81-219. U.S. Department of Transportation.

PIETRANTONIO, H. **Manual de procedimento de pesquisa para análise de conflitos de tráfego em interseções** (1991) São Paulo: Seção de Engenharia de Tráfego e Transporte de Passageiros–IPT.

PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO PAULO (2021) **Os conceitos de Visão Zero e Sistemas Seguros**. Página oficial da Prefeitura. Disponível em: <https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/mobilidade/plano_seguranca_viaria/index.php?p=262881>. Acesso em: 20 set. 2021.

SAUNIER, N.; SAYED, T. (2006) **A feature-based tracking algorithm for vehicles in intersections**. The 3rd Canadian Conference on Computer and Robot Vision (CRV'06). IEEE. p. 59-59.

SAUNIER, N.; SAYED, T. (2007) **Automated road safety analysis using video data**. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, v. 2019, n. 57-64, p. 9-10.

SAUNIER, N.; SAYED, T. (2008) **A Probabilistic Framework for the Automated Analysis of the Exposure to Road Collision.** Transportation Research Record, v. 2083, n. 1, p. 96-104.

SAUNIER, N.; SAYED, T.; LIM, C. (2007) **Probabilistic collision prediction for vision-based automated road safety analysis.** 2007 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference, p. 872-878.

SAYED, T.; ZAKI, M. H.; AUTEY, J. (2013) **Automated safety diagnosis of vehicle-bicycle interactions using computer vision analysis.** Safety Science 59, p. 163-172.

SAYED, T.; ZEIN, S. (1999) **Traffic conflict standards for intersections.** Transportation Planning and Technology, v. 22, n. 4, p. 309-323.

SHINAR, D. (1984) **The traffic conflict technique: A subjective vs. objective approach.** Journal of Safety Research, v. 15, n. 4, p. 153-157.

TARKO, A.; DAVIS G.; SAUNIER, N.; SAYED, T.; WASHINGTON, S. (2009) **Surrogate Measures of Safety.**

TINGVALL, C.; HAWORTH, N. (1999) **Vision Zero – An ethical approach to safety and mobility.** 6th ITE International Conference Road Safety & Traffic Enforcement, Melbourne.

TIWARI, G.; MOHAN, D.; FAZIO, J. (1998) **Conflict analysis for prediction of fatal crash locations in mixed traffic streams.** Accident Analysis & Prevention, v. 30, n. 2, p. 207-215.

VAN AREM, B.; DE VOS, A. P.; VANDERSCHUREN, M. J. W. A. (1997) **The effect of a special lane for intelligent vehicles on traffic flows.** TNO, Inro, Países Baixos.

WARD, J. R.; AGAMENNONI, G.; WORRALL, S.; BENDER, A.; NEBOT, E. (2015) **Extending Time To Collision for probabilistic reasoning in general traffic scenarios.** Transportation Research Part C 51, p. 66-82.

WILLIAMS, M. J. (1981) **Validity of The Traffic Conflicts Technique.** Accident Analysis & Prevention, v. 13, n. 2, p. 133-145.

WU, K.; JOVANIS, P. P. (2012) **Crashes and crash-surrogate events: Exploratory modeling with naturalistic driving data.** Accident Analysis & Prevention, v. 45, n. 2, p. 507-516.

YANG, D.; OZBAY, K.; XIE, K.; YANG, H.; ZUO, F.; SHA, D. (2021) **Proactive safety monitoring: A functional approach to detect safety-related anomalies using unmanned aerial vehicle video data.** Transportation Research Part C 127.

YOUNG, W.; SOBHANI, A.; LENNÉ, M. G.; SARVI, M. (2014) **Simulation of safety: A review of the state of the art in road safety simulation modelling.** Accident Analysis & Prevention, v. 66, p. 89-103.

ZAKI, M. H.; SAYED, T.; SHAABAN, K (2014) **Use of Drivers' Jerk Profiles in Computer Vision-Based Traffic Safety Evaluations.** Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, n 2434, Transportation Research Board of the National Academies, p. 103-112.

ZHENG, L.; ISMAIL, K.; MENG, X. (2014) **Traffic conflict techniques for road safety analysis: open questions and some insights.** Canadian Journal of Civil Engineering, v. 41, n. 7, p. 633-641.