

APLICABILIDADE DE REGIME DE VELOCIDADES MÁXIMAS VARIÁVEIS

MARCELO SALIGNAC BRASIL

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM PLANEAMENTO DO TERRITÓRIO E
TRANSPORTES**

Orientador: Professor Doutor José Pedro Maia Pimentel Tavares

JULHO DE 2022

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2021/2022

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

✉ m.ec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado em Engenharia Civil - 2021/2022 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2022.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

A meus Pais

Eu preferiria o temor do conhecimento ao temor da ignorância em qualquer dia.

Douglas Adams

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, que dedicaram anos de esforço à minha formação. Aos meus amigos, pelo apoio. À Agnieszka Kuberek, por tudo.

Ao meu orientador, Professor Doutor José Pedro Maia Pimentel Tavares, pelo aconselhamento, pelo incentivo e pela disponibilidade.

Aos Engenheiros Carlos Oliveira e João Neves pelo apoio, e à Ascendi pela disponibilização dos dados utilizados neste trabalho.

RESUMO

A sinistralidade rodoviária é um problema de saúde pública a nível mundial, com especial importância para países em que o meio de transporte mais utilizado é o modo rodoviário. Em Portugal, a utilização deste modo aumentou em média 3,68% ao ano entre 2015 e 2019 (Instituto da Mobilidade e dos Transportes, 2019), e este aumento veio acompanhado de um aumento constante no número de acidentes desde 2013 (Autoridade Nacional de Segurança Rodoviária, 2019).

Dentre as muitas variáveis envolvidas na qualificação da segurança rodoviária, a velocidade é reconhecida como uma das mais importantes. Intervenções que busquem reduzir a frequência de acidentes e a severidade destes devem, então, ter em consideração o controlo desta variável.

Desenvolvimentos tecnológicos recentes permitiram a introdução de Sistemas Inteligentes de Transportes às redes rodoviárias de muitos países, mas esta prática ainda não é relevante em Portugal. Em particular, a Gestão Dinâmica de Velocidades permite uma atuação direta sobre as velocidades praticadas nas autoestradas. Uma das estratégias mais utilizadas para o controlo da velocidade é o regime de Limites Máximos de Velocidade Variáveis, que consiste em alterar o limite de velocidade conforme condições de tráfego em tempo real.

Esta estratégia também pode ser utilizada para reduzir os riscos de acidentes causados por más condições climáticas, por exemplo. Dentre estas condições, a precipitação é identificada como fenómeno de maior impacto para a segurança rodoviária. Um sistema de Limites Máximos de Velocidade Variáveis pode ser adaptado para funcionar de acordo com informações recolhidas de estações meteorológicas.

O presente trabalho avalia a aplicabilidade de um sistema nestes moldes no sublanço entre Ribeira de Pena e Vila Pouca de Aguiar da autoestrada A7, no Norte de Portugal, operada pela empresa Ascendi. Para tal, um modelo de previsão de acidentes é desenvolvido e utilizado para a formulação de estratégias de aplicação, que são posteriormente testadas com recurso ao software de simulação VISSIM.

Os resultados encontrados confirmam a importância da precipitação como previsor de acidentes e a eficácia dos sistemas de Limites Máximos de Velocidade Variáveis para a melhoria da segurança rodoviária.

Destaca-se a aplicação com limites máximos alterados gradualmente no tempo, que apresentaram reduções de 49% e 86% da variabilidade de velocidades para reduções de 17% e 50% do limite máximo de velocidade estabelecido.

PALAVRAS-CHAVE: Segurança rodoviária, Limites Máximos de Velocidade Variáveis, Sistemas Inteligentes de Transporte, Precipitação, Efeitos Climáticos

ABSTRACT

Road traffic crashes are a public health problem worldwide, with particular importance in countries where the most used means of transport is the road mode. In Portugal, the use of this mode has increased an average of 3,68% per year between 2015 and 2019 ("Anuário Estatístico da Mobilidade e dos Transportes", 2019), while, at the same time, the number of accidents also increased considerably ("Relatório Anual de Segurança Rodoviária" 2019).

Among the many variables involved in the qualification of road safety, the speed is recognized as one of the most important. Interventions that seek to reduce the frequency of accidents and their severity should then consider the control of this variable.

Recent technological developments have allowed the introduction of Intelligent Transport Systems (ITS) to road networks in many countries, but this practice is not yet widely spread in Portugal. In particular, the Dynamic Speed Management allows direct action on the speeds practiced in the highways. One of the most used strategies for speed control is the Variable Speed Limits strategy, which consists of changing the speed limit according to real-time traffic conditions.

This strategy can also be used to reduce the risk of accidents caused by poor weather conditions. Among these conditions, precipitation is identified as the phenomenon with the greatest importance for road safety. A Variable Speed Limits system can be adapted to function according to information collected from weather stations.

The present work evaluates the applicability of a system in this fashion on a section of the A7 highway from northern Portugal, operated by Ascendi, between Ribeira de Pena and Vila Pouca de Aguiar. To this end, an accident forecast model is developed and used for the formulation of application strategies, which are later tested using the VISSIM traffic simulation software.

The results confirm the importance of precipitation as an accident predictor and the effectiveness of Variable Speed Limits for improving road safety.

The application with Variable Speed Limits changed gradually over time performed best, with reductions of 49% and 86% of the variability of speeds when the speed was reduced by 17% and 50% of the established speed limits, respectively.

KEYWORDS: Road Safety, Variable Speed Limits, Intelligent Transport Systems, Precipitation, Weather Effects.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS.....	i
RESUMO	III
ABSTRACT	V
 1. INTRODUÇÃO	 1
1.1. ENQUADRAMENTO GERAL	1
1.2. OBJETIVOS	2
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	2
 2. LIMITES DE VELOCIDADE MÁXIMA VARIÁVEIS	 5
2.1. SISTEMAS DE TRANSPORTE INTELIGENTES	5
2.2. VELOCIDADE E SEGURANÇA RODOVIÁRIA.....	5
2.2.1. RELAÇÃO ENTRE A VELOCIDADE DE TRÁFEGO E OS ACIDENTES	5
2.2.2. RELAÇÃO ENTRE A DISPERSÃO DA VELOCIDADE ENTRE VEÍCULOS E OS ACIDENTES	8
2.3. CLIMA E SEGURANÇA RODOVIÁRIA.....	10
2.3.1. PRECIPITAÇÃO	10
2.3.2. OUTROS FENÓMENOS CLIMÁTICOS.....	12
2.4. EFEITOS DA APLICAÇÃO DOS LIMITES MÁXIMOS VARIÁVEIS	12
2.4.1. EFEITO SOBRE A VELOCIDADE DOS VEÍCULOS	12
2.4.2. EFEITO SOBRE A DISPERSÃO DAS VELOCIDADES ENTRE VEÍCULOS	13
2.4.3. EFEITO SOBRE OS VOLUMES DE TRÁFEGO.....	15
2.5. EXEMPLOS DE APLICAÇÃO	17
2.6. VIABILIDADE ECONÓMICA.....	18
 3. METODOLOGIA E CASO DE ESTUDO	 21
3.1. ÁREA DE ESTUDO.....	21
3.2. METODOLOGIA	22
3.3. MODELO DE PREVISÃO DE ACIDENTES	23
3.3.1. DESCRIÇÃO DAS VARIÁVEIS	23
3.3.2. ESCOLHA DO MÉTODO DE MODELAÇÃO.....	25
3.3.3. RESULTADOS	26

3.4. SIMULAÇÃO DE TRÁFEGO	26
3.4.1. MODELOS MICROSCÓPICOS	26
3.4.2. MODELO VISSIM	27
3.4.3. RECOLHA DE DADOS E CARACTERIZAÇÃO DO SUBLANÇO DE ESTUDO	29
3.4.4. CONSTRUÇÃO DA REDE	31
3.4.5. CALIBRAÇÃO DO MODELO	32
3.4.6. CENÁRIOS.....	33
3.4.7. AMPLITUDE DE VARIAÇÃO DOS LIMITES MÁXIMOS DE VELOCIDADE.....	37
3.4.8. TEMPORIZAÇÃO.....	39
3.4.9. DADOS DE SAÍDA.....	39
3.5. RESULTADOS.....	40
3.5.1. DESVIOS PADRÃO DA VELOCIDADE E DOS <i>HEADWAYS</i> – 2 MM DE PRECIPITAÇÃO	40
3.5.2. DESVIOS PADRÃO DA VELOCIDADE E <i>HEADWAYS</i> – 5 MM DE PRECIPITAÇÃO	45
3.5.3. TEMPO DE VIAGEM	51
 4. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	 55
4.1. CONCLUSÕES	55
4.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	56
 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	 59
 ANEXOS.....	 63
ANEXO I - DISTRIBUIÇÃO DAS VELOCIDADES MEDIDAS POR RADAR NA AUTOESTRADA A7 PK 96	65
ANEXO II - DADOS DE SAÍDA DA SIMULAÇÃO FEITA COM O PTV VISSIM 2020... 71	
DESVIOS PADRÃO MÉDIOS DA VELOCIDADE MÉDIA (KM/H) EM INTERVALOS DE 5 MINUTOS ... 71	
SENTIDO CRESCENTE	71
SENTIDO DECRESCENTE	73
DESVIOS PADRÃO MÉDIOS DO <i>HEADWAYS</i> (M) EM INTERVALOS DE 5 MINUTOS	76
SENTIDO CRESCENTE	76
SENTIDO DECRESCENTE	78
TEMPOS DE VIAGEM MÉDIOS (S) EM INTERVALOS DE 5 MINUTOS	80

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 – Relação entre velocidade e acidentes em estradas urbanas e rurais. Fildes et al. (1991).....	6
Fig. 2 – Ilustração do <i>Power Model</i> e da relação entre uma mudança percentual na velocidade média e a respetiva mudança no número de vítimas (G. Nilsson 2004).....	8
Fig. 3 – Relação entre o desvio da velocidade desenvolvida (em milhas por hora) e o envolvimento em acidentes diurnos e noturnos encontrada por Solomon em 1964.	9
Fig. 4 – Relação entre o desvio da velocidade desenvolvida e o envolvimento em acidentes encontrada por Kloeden et al. (2001).....	10
Fig. 5 – Efeito observado dos diferentes tipos de limite de velocidade (fixo e variável) na homogeneidade das velocidades de um condutor individual (adaptado de van Nes, Brandenburg e Twisk 2008b).	14
Fig. 6 – Níveis de sofisticação de sistemas de limites máximos de velocidade (adaptado de van Nes, Brandenburg e Twisk 2008b).....	14
Fig. 7 – Efeito dos diferentes níveis de sofisticação das sinalizações dos limites máximos de velocidade (adaptado de van Nes, Brandenburg e Twisk 2008b).	15
Fig. 8 – Relações entre as variáveis que descrevem uma corrente de tráfego através da Relação Fundamental.....	16
Fig. 9 – Diagrama básico de tráfego, em evidência o efeito da aplicação de um limite de velocidade (Hegyi 2004).	17
Fig. 10 – Mapa da região da autoestrada A7, destacada em azul. Adaptado de Map data ©2022 Inst. Geogr. Nacional.	21
Fig. 11 – Mapa do sublanço estudado, entre Ribeirda de Pena e Vila Pouca de Aguiar A7, destacada em azul. Adaptado de Map data ©2022 Inst. Geogr. Nacional.....	22
Fig. 12 – Modelo de <i>car following</i> de Wiedemann (1974). 1: Estado de “comportamento desregulado”. 2: Estado “ <i>following</i> ”. 3: Estado de “aproximação”. 4: Estado de “frenagem”. “d”: distância. Δv : variação de velocidade. Adaptado do manual do utilizador VISSIM 2020.	28
Fig. 13 – Radar modelo Viacount II posicionado no PK 96 da autoestrada A7 para recolher dados de tráfego.	29
Fig. 14 – Distribuição das velocidades medidas com radar automático na autoestrada A7, PK 96, sentido crescente.....	30
Fig. 15 – Distribuição das velocidades medidas com radar automático na autoestrada A7, PK 96, sentido decrescente.	31
Fig. 16 – Rede de tráfego utilizada nas simulações. Representado em amarelo o desenho dos arcos da rede.....	32
Fig. 17 – Esquema ilustrativo do cenário 1 de simulação.	33
Fig. 18 – Esquema ilustrativo do cenário 2 de simulação.	34
Fig. 19 – Esquema ilustrativo do cenário 3 de simulação.	35
Fig. 20 – Esquema ilustrativo do cenário 4 de simulação.	35
Fig. 21 – Esquema ilustrativo do cenário 5 de simulação.	36
Fig. 22 – Esquema ilustrativo do cenário 6 de simulação.	36
Fig. 23 – Esquema ilustrativo do cenário 7 de simulação.	37
Fig. 24 – Resultado do desvio padrão médio das velocidades na secção de medição em sentido crescente com risco associado a 2 mm de precipitação.	40
Fig. 25 – Resultado do desvio padrão médio das velocidades na secção de medição em sentido decrescente com risco associado a 2 mm de precipitação.....	41

Fig. 26 – Relação entre as médias dos desvios padrão médios das velocidades na secção de medição em sentido crescente com risco associado a 2 mm precipitação.	41
Fig. 27 – Relação entre as médias dos desvios padrão médios das velocidades na secção de medição em sentido decrescente com risco associado a 2 mm de precipitação.....	42
Fig. 28 – Resultado do desvio padrão médio do <i>headway</i> médio na secção de medição em sentido crescente com risco associado a 2 mm de precipitação.n	44
Fig. 29 – Resultado do desvio padrão médio do <i>headway</i> médio na secção de medição em sentido decrescente com risco associado a 2 mm de precipitação.	44
Fig. 30 – Resultado do desvio padrão médio das velocidades na secção de medição em sentido crescente com risco associado a 5 mm de precipitação.....	46
Fig. 31 – Resultado do desvio padrão médio das velocidades na secção de medição em sentido decrescente com risco associado a 5 mm de precipitação.	46
Fig. 32 – Relação entre as médias dos desvios padrão médios das velocidades na secção de medição em sentido crescente com risco associado a 5 mm precipitação.	47
Fig. 33 – Relação entre as médias dos desvios padrão médios das velocidades na secção de medição em sentido decrescente com risco associado a 5 mm precipitação.	47
Fig. 34 – Resultado do desvio padrão médio do <i>headway</i> médio na secção de medição em sentido crescente com risco associado a 5 mm de precipitação.	49
Fig. 35 – Resultado do desvio padrão médio do <i>headway</i> médio na secção de medição em sentido decrescente com risco associado a 5 mm de precipitação.	50
Fig. 36 – Resultado do tempo total médio de viagem de todos os veículos na rede.	52
Fig. 37 – Aumento médio do tempo total médio de viagem dos veículos na rede com relação ao tempo médio de viagem do cenário base.....	52

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Caracterização dos custos de implementação do sistema VSL em <i>Ranger Hill</i> .	19
Tabela 2 – Descrição da precipitação horária registada entre 2016 e 2021 pela estação meteorológica de Santa Marta da Montanha.	24
Tabela 3 – Descrição da velocidade do vento horária registada entre 2016 e 2021 pela estação meteorológica de Santa Marta da Montanha.	24
Tabela 4 – Descrição dos acidentes ocorridos entre 2016 e 2021 na autoestrada A7 entre Cabeceira de Basto e Vila Pouca de Aguiar.	24
Tabela 5 – Resultados e coeficientes do modelo de previsão de acidentes.	26
Tabela 6 – Descrição do tráfego da autoestrada A7, PK 96. Medições feitas com radar automático.	30
Tabela 7 – Descrição das velocidades medidas com radar automático na autoestrada A7, PK 96.	30
Tabela 8 – Links da rede de modelação no VISSIM.	32
Tabela 9 – Resumo dos cenários de simulação no programa VISSIM.	37
Tabela 10 – Descrição das médias dos desvios padrão médios das velocidades em sentido crescente com risco associado a 2 mm de precipitação.	42
Tabela 11 – Descrição das médias dos desvios padrão médios das velocidades em sentido decrescente com risco associado a 2 mm de precipitação.	43
Tabela 12 – Descrição das médias dos headways médios em sentido crescente com risco associado a 2 mm de precipitação.	45
Tabela 13 – Descrição das médias dos headways médios em sentido decrescente com risco associado a 2 mm de precipitação.	45
Tabela 14 – Descrição das médias dos desvios padrão médios das velocidades em sentido crescente com risco associado a 5 mm de precipitação.	48
Tabela 15 – Descrição das médias dos desvios padrão médios das velocidades em sentido decrescente com risco associado a 5 mm de precipitação.	48
Tabela 16 – Descrição das médias dos headways médios em sentido crescente com risco associado a 5 mm de precipitação.	50
Tabela 17 – Descrição das médias dos headways médios em sentido decrescente com risco associado a 5 mm de precipitação.	51
Tabela 18 – Descrição das médias dos tempos totais médios de viagem.	53

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO GERAL

A sinistralidade rodoviária é a primeira causa de morte entre jovens (5 a 29 anos) e a oitava causa para todas as idades, e por isso é considerada pela Organização Mundial de Saúde (OMS) como um problema de saúde pública (OMS, 2022). A política de segurança rodoviária da Comissão Europeia 2021-2030 tem como um dos seus objetivos uma redução de 50% no número de mortos por meio de intervenções baseadas em evidências ("EU Road Safety Policy Framework", 2020).

Na última década o modo rodoviário como meio de transporte em Portugal teve um aumento constante, com uma variação anual média de 3,68% positivos entre 2015 e 2019 ("Anuário Estatístico da Mobilidade e dos Transportes" 2019). Juntamente com este crescimento, o número de acidentes com vítimas também aumentou de forma quase constante desde 2013 ("Relatório Anual de Segurança Rodoviária" 2019). Refira-se que o custo económico anual deste problema estimado pela Autoridade Nacional de Segurança Rodoviária (ANSR) é superior a 3,7 mil milhões de euros, 1,6% do PIB nacional.

Mais recentemente, devido às condições criadas pela pandemia COVID-19, os dados de acidentes entre 2020 e 2021 apresentam uma diminuição no número de acidentes em comparação com anos anteriores, provavelmente explicada pela grande redução do número de veículos em circulação quando aplicadas as restrições de movimentação. No entanto, enquanto a frequência dos acidentes foi reduzida, uma parte maior destes acidentes teve vítimas mortais em relação a 2019, com um crescimento de 11% ("Relatório Anual de Sinistralidade" 2021). Uma possível explicação para esse aumento é que o menor volume de tráfego tornou possível a circulação em regimes mais livres e, consequentemente, em condições que potenciam a adoção por parte dos condutores de velocidades mais elevadas.

Os efeitos da velocidade nos acidentes já são bem conhecidos: o aumento da velocidade leva ao aumento da severidade dos acidentes, e o aumento da variabilidade da velocidade entre veículos faz com que o número de acidentes aumente em simultâneo (Ronan 2018). O uso de limites máximos variáveis permite intervir para reduzir estes dois aspetos de forma dinâmica e sem se fazer necessárias intervenções na geometria da autoestrada, que tendem a ser mais onerosas. Por outro lado, o risco de acidentes também pode ser potenciado em condições climáticas adversas, sendo o fenómeno da precipitação, em especial, associado a um aumento da frequência de acidentes rodoviários.

Uma das possíveis intervenções para alcançar os objetivos da Segurança Rodoviária é o recurso a Sistemas Inteligentes de Transporte (*Intelligent Transportation Systems*, ITS), designadamente a implementação dos denominados sistemas de Limites de Velocidades Máximas Variáveis (*Variable Speed Limits*, VSL) em áreas com alto risco de acidentes rodoviários. Este tipo de intervenção faz parte de uma estratégia de controlo de tráfego inteligente com base em dados obtidos em tempo real. Assim, de acordo com as condições de tráfego e/ou condições climatéricas existentes, os limites máximos de velocidade podem ser aumentados ou reduzidos com o intuito de atingir efeitos positivos quer no âmbito da segurança rodoviária quer para proporcionar melhores condições de circulação.

Deste modo, o presente trabalho foi desenvolvido com a intenção de compreender se este tipo de gestão de tráfego pode ser implementada com sucesso numa autoestrada em que foram analisadas as condições climatéricas e que a precipitação foi observada como fator de risco.

1.2. OBJETIVOS

O presente trabalho incide sobre a segurança rodoviária em autoestradas e tem como principal objetivo avaliar a aplicação da Gestão Dinâmica de Velocidades no sublanço entre Ribeira de Pena e Vila Pouca de Aguiar da autoestrada A7 do Norte de Portugal, operada pela Ascendi, por implementação de Limites Máximos de Velocidade Variáveis tendo presente as condições climatéricas, mais especificamente a precipitação.

Para tal, o estudo incidiu em três pontos principais:

- determinar a amplitude de variação dos limites de velocidade máximos;
- determinar os critérios que determinam uma mudança nos limites;
- definir a fase de transição para a alteração dos limites de velocidade.

Este tipo de gestão de tráfego ainda não é utilizado em Portugal, apesar de existirem casos de aplicação em outros países europeus. Sendo assim, para o desenvolvimento de uma estratégia de aplicação e a definição dos pontos mencionados acima, foram analisadas as formas de implementação em outros países, com atenção aos objetivos de implementação de cada caso e às condições do ambiente em que estes casos estão inseridos.

Entre os objetivos da aplicação de sistemas VSL, destacam-se a melhoria do fluxo de tráfego e o aumento da segurança rodoviária. Os pontos principais de estudo assumem valores diferentes a depender da prioridade dada a estes objetivos, podendo haver vantagens e desvantagens a serem equilibradas pela entidade gestora. A metodologia de estudo desta dissertação foi desenvolvida de forma que o foco esteja sobre a segurança, mas tendo presente os efeitos da aplicação dos limites máximos de velocidade variáveis nos outros aspetos do tráfego.

Para compreender a relação entre as condições climatéricas da estrada estudada e a segurança rodoviária, foi desenvolvido um modelo de previsão de acidentes com base em dados de uma estação meteorológica e do histórico de acidentes registados pela Ascendi, empresa concessionária do troço de autoestrada estudado.

Uma simulação do tráfego da autoestrada foi feita com recurso ao *software* de simulação VISSIM para o estudo dos efeitos da gestão dinâmica sobre a segurança rodoviária e sobre o fluxo de tráfego. Para a calibração do simulador foram recolhidas informações das condições de tráfego da autoestrada, especificamente o volume de tráfego, a composição da corrente de tráfego quanto ao tipo de veículos (leves e pesados) e a distribuição de velocidades praticadas por estes veículos.

1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está organizada em 5 capítulos. O primeiro capítulo faz a introdução do contexto e dos objetivos da dissertação.

O segundo capítulo, Limites de Velocidade Máxima Variáveis, introduz os conceitos de Sistema de Transporte Inteligente e o conceito que dá nome ao capítulo, assim como faz uma revisão da literatura que envolve a velocidade dos veículos e as variáveis climáticas no contexto da segurança rodoviária,

em particular a variável de precipitação, que é central a este trabalho. São explorados os possíveis efeitos de aplicação dos Limites de Velocidade Máxima Variáveis e exemplos de aplicação em outros países.

O terceiro capítulo, Metodologia e Caso de Estudo, apresenta os métodos e ferramentas utilizadas para a análise de aplicabilidade dos Limites de Velocidade Máxima Variáveis e as características da autoestrada escolhida para a realização do estudo. O capítulo contém uma explicação dos modelos de previsão de acidentes e de simulação de tráfego que foram utilizados, a forma como estes modelos foram aplicados e os resultados das medições feitas a partir destes modelos.

No quarto capítulo, Conclusões e Desenvolvimentos Futuros, é feito um breve sumário do caso de estudo e dos resultados encontrados. São analisados o desempenho das formas de aplicação de sistemas de limites máximos de velocidade variáveis quanto à segurança rodoviária e à eficiência do fluxo de tráfego. São também feitas considerações sobre os aspetos que não foram estudados neste trabalho, que podem servir de sugestões para futuros estudos sobre o tema da dissertação.

O quinto capítulo contém as referências bibliográficas utilizadas neste trabalho.

2

LIMITES DE VELOCIDADE MÁXIMA VARIÁVEIS

2.1. SISTEMAS DE TRANSPORTE INTELIGENTES

A Diretiva 2010/40/EU do Parlamento e do Conselho da União Europeia define os Sistemas de Transporte Inteligentes (*Intelligent Transportation Systems*, ITS) como uma aplicação avançada que visa fornecer serviços inovadores relacionados com diferentes modos de transporte e gestão de tráfego, não só permitindo aos utilizadores uma maior e melhor informação e segurança, como também redes de transporte coordenadas e “inteligentes”. Deste modo, são aplicadas principalmente tecnologias de informação e comunicação aos diversos campos de transporte rodoviário para desenvolver estratégias de gestão ativa de tráfego.

Uma destas estratégias é a denominada por Limites de Velocidades Máximas Variáveis (*Variable Speed Limits*, VSL), que é utilizada primariamente para aumentar a concentração de veículos em situações de congestionamento ou para promover uma homogeneização das variâncias das velocidades dos veículos que circulam (Strömgren e Lind 2016), tendo assim também presente questões referentes à segurança rodoviária.

Com base em informações como a velocidade média, a taxa de ocupação e o débito, que podem ser recolhidas através de equipamentos de deteção automáticos instalados junto às faixas de rodagem em locais estratégicos, os sistemas ITS mantêm um controlo constante da velocidade praticada nas vias rodoviárias e com a possibilidade de alterar os limites máximos de velocidade permitidos utilizando Painéis de Mensagens Variável (van Nes, Brandenburg e Twisk 2008a).

De forma similar, pequenas estações meteorológicas podem ser posicionadas em intervalos regulares ao longo da estrada para fornecer dados em tempo real das condições climatéricas, configuráveis tendo em atenção apenas a recolha de dados relacionados com fenómenos considerados geradores de risco para a região em causa. Com base nestas informações, os limites máximos podem ser adaptados de acordo com a severidade da ocorrência do fenómeno climático (Rämä 1999).

2.2. VELOCIDADE E SEGURANÇA RODOVIÁRIA

2.2.1. RELAÇÃO ENTRE A VELOCIDADE DE TRÁFEGO E OS ACIDENTES

A relação entre velocidade e segurança é um assunto que gera alguma controvérsia em estudos de transporte (Elvik, Christensen e Helene Amundsen 2004). Há uma extensa literatura sobre a associação entre velocidade de tráfego, variação de velocidades e acidentes rodoviários, uma parte focada na frequência de acidentes e outra na gravidade dos acidentes.

Dentre estes aspetos, a associação entre velocidade de tráfego e gravidade de acidentes é bem entendida como uma relação positiva, explicada como efeito das grandes quantidades de energia cinética envolvidas, que aumentam exponencialmente com a velocidade (Elvik, Christensen e Helene Amundsen

2004). Entretanto, estudos sobre a relação entre velocidade de tráfego e a frequência de ocorrência de acidentes rodoviários geram resultados conflitantes e por vezes contraintuitivos (Quddus 2013).

Ainda assim, o número de estudos concluem que a relação positiva é superior aos que afirmam o contrário, e os argumentos em favor do aumento da frequência de acidentes com a velocidade são razoáveis: há um aumento da distância percorrida face ao tempo de reação necessário para evitar obstáculos e eventos não previstos pelo condutor (Ronan 2018). De facto, quanto mais elevada a velocidade, maior a distância percorrida durante o tempo de reação e antes de uma resposta por parte do condutor, o que reduz a oportunidade de evitar o acidente.

Num estudo feito na Austrália (Fildes, Rumbold e Leening 1991) foram recolhidos autorrelatos de condutores que desenvolviam velocidades abaixo de 15% e acima de 85% da distribuição de velocidades do tráfego em duas estradas rurais com velocidade limite de 100 Km/h e outras duas estradas urbanas com limite de 60 Km/h. Estes condutores foram parados e questionados sobre o histórico de acidentes nos últimos 5 anos. Os resultados foram curvas exponenciais para ambas as estradas (Fig. 1). A curva de risco de acidente para as estradas urbanas assume uma forma muito mais acentuada, mas deve-se considerar que um aumento de velocidade para limites máximos próximos de 60 Km/h é mais facilmente atingido do que em situações como as estradas rurais, com limites próximos de 100 Km/h.

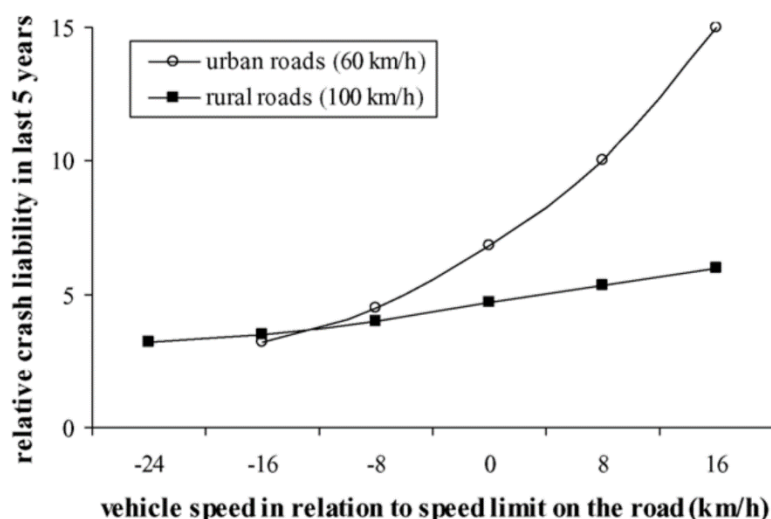


Fig. 1 – Relação entre velocidade e acidentes em estradas urbanas e rurais. Fildes et al. (1991).

Outro estudo usualmente citado na literatura usa a velocidade média na secção da estrada antes e depois de uma intervenção como a alteração do limite máximo de velocidade (Göran Nilsson, 1982). O estudo compara o número de acidentes numa estrada rural da Suécia antes e depois de alterar o limite máximo de 110 Km/h para 90 Km/h, com estradas de controle em que o limite de velocidade se manteve a 90 Km/h. O resultado é que uma redução do limite máximo é acompanhada por uma redução no número de acidentes.

Para descrever a relação entre acidentes e velocidade (eq. 2), Nilsson (Göran Nilsson 1982) adaptou a fórmula da energia cinética (eq. 1) de forma que o efeito da massa é desprezado.

$$E_c = \frac{mv^2}{2} \quad (1)$$

$$A_2 = A_1 \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^2 \quad (2)$$

Em que E_c é a energia cinética, m é a massa, v_1 e A_1 são a velocidade média e o número de acidentes antes da intervenção e v_2 e A_2 a velocidade e o número de acidentes depois da intervenção, respetivamente. Vê-se que com uma velocidade posterior à intervenção menor do que a anterior, o fator que multiplica o número de acidentes antes da intervenção é menor do que 1, o que significa uma redução no número de acidentes após a intervenção.

Para além da equação de previsão de acidentes em geral, Nilsson também desenvolve uma fórmula que estabelece a relação entre a velocidade média na secção da estrada e o número de acidentes fatais (eq. 3). Neste caso, o expoente da razão entre as velocidades é 4, o dobro do expoente para acidentes em geral.

$$A_{\text{fatais } 2} = A_{\text{fatais } 1} \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^4 \quad (3)$$

Em que v_1 e A_1 são a velocidade média e o número de acidentes fatais antes da intervenção e v_2 e A_2 a velocidade e o número de acidentes fatais depois da intervenção, respetivamente.

Este modelo ficou conhecido como “*Power Model*” e foi posteriormente revisto e estudado em aplicações para diferentes estradas em outros países (Ronan 2018). As expressões do modelo são simples em princípio e em aplicação, o que impulsionou a popularidade do *Power Model*. Uma relação exponencial evidência que o efeito da velocidade sobre o número e sobre a severidade dos acidentes é provavelmente o fator de maior importância em relação a segurança rodoviária, em especial para estradas não urbanas em que as velocidades desenvolvidas são mais elevadas. Da comparação entre as equações (2) e (3) é evidente que alterações na velocidade dos veículos causam um efeito muito maior na severidade dos acidentes do que na frequência.

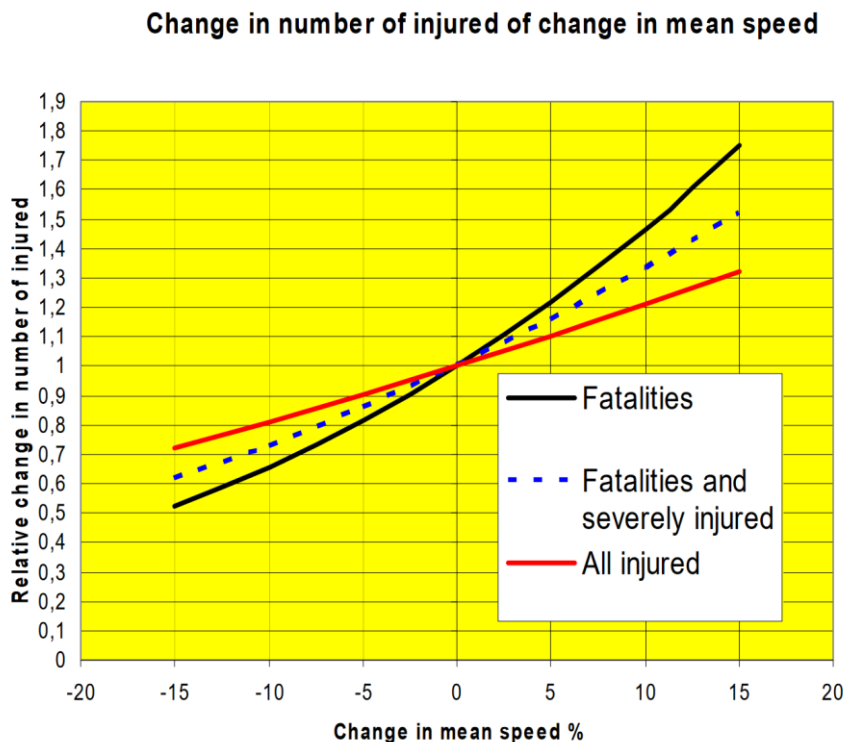


Fig. 2 – Ilustração do *Power Model* e da relação entre uma mudança percentual na velocidade média e a respetiva mudança no número de vítimas (G. Nilsson 2004).

2.2.2. RELAÇÃO ENTRE A DISPERSÃO DA VELOCIDADE ENTRE VEÍCULOS E OS ACIDENTES

Além da velocidade absoluta dos veículos, a dispersão da velocidade entre veículos também é observada como fator de risco de acidentes em estudos de segurança rodoviária. Recentemente, estes estudos concluem que a dispersão de velocidades explica melhor a frequência de acidentes do que a velocidade absoluta (Quddus 2013).

Nos estudos iniciais nesta área de investigação, a relação entre a dispersão de velocidades e os acidentes é geralmente determinada através de uma comparação entre a velocidade no período imediatamente anterior ao acidente e a média da velocidade praticada no mesmo troço de estrada. A relação encontrada nestes estudos é representada por uma curva em forma de “U” (Fig. 3), o que significa que o risco de acidentes é elevado tanto para veículos que praticam velocidades muito inferiores à média das velocidades dos outros veículos quanto para o caso contrário, em que as velocidades praticadas são elevadas.

Um estudo de 1964 ainda citado com frequência foi realizado por Solomon (1964), que comparou as velocidades de 10 mil veículos envolvidos em acidentes com as velocidades de outros 29 mil veículos como variáveis de controlo em autoestradas rurais dos Estados Unidos. Para determinar a velocidade dos veículos logo antes dos acidentes, foram recolhidos relatos dos próprios condutores com a velocidade praticada antes do condutor notar o risco de acidente. Estimativas também foram recolhidas de agentes da polícia e de testemunhas. Veículos que se deslocaram a velocidades muito acima ou abaixo da velocidade média (diferença de 50 Km/h ou mais) estiveram envolvidos em um número muito maior de acidentes, proporcionalmente.

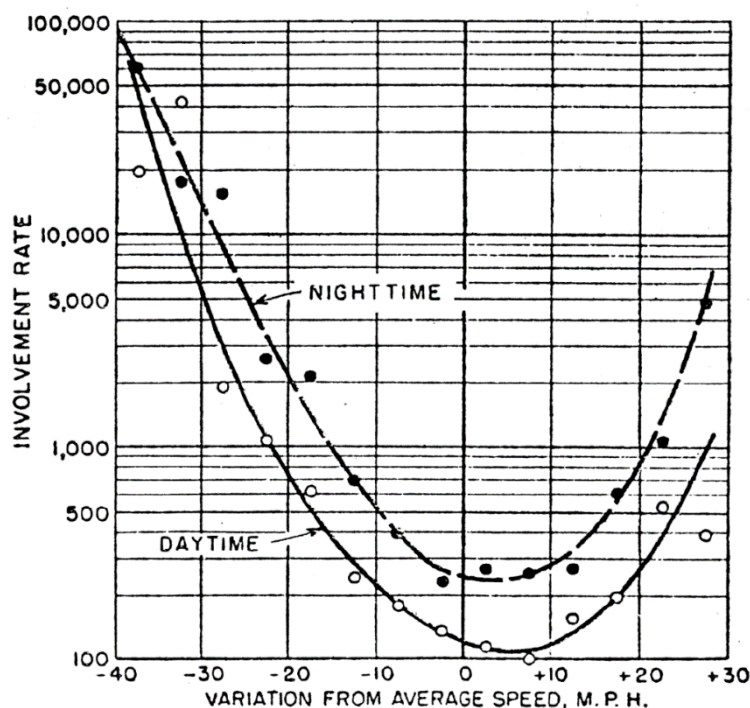


Fig. 3 – Relação entre o desvio da velocidade desenvolvida (em milhas por hora) e o envolvimento em acidentes diurnos e noturnos encontrada por Solomon em 1964.

Revisões posteriores a estes estudos sugerem que a forma com que foram recolhidos os dados podem ter inadvertidamente introduzido uma tendência ao aumento aparente do risco para variações negativas (baixas velocidades) em relação a média das velocidades, em particular a dependência de relatos para a determinação de velocidades pré acidente (Quddus 2013).

Estudos mais recentes refutam a ideia de que conduzir a velocidades demasiadamente baixas em relação à velocidade média dos outros veículos possam aumentar o risco de acidente na mesma proporção encontrada por Solomon. De facto, no estudo feito de forma similar de Kloeden, Ponte e McLean de 2001, a relação se assemelha a uma curva exponencial, com o número de acidentes mais elevado para maiores desvios positivos de velocidade (Fig. 4).

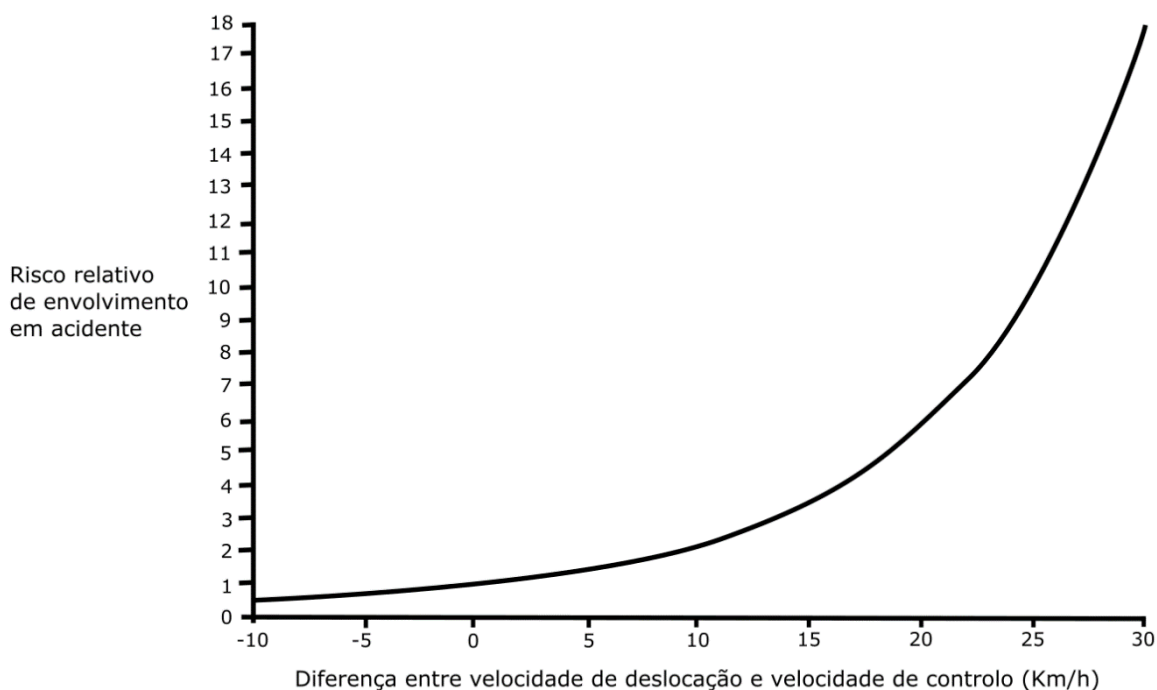


Fig. 4 – Relação entre o desvio da velocidade desenvolvida e o envolvimento em acidentes encontrada por Kloeden et al. (2001)

Para determinar a velocidade dos veículos envolvidos em acidentes, Kloeden, Ponte e McLean (2001) utilizaram técnicas de reconstrução de acidentes com investigações detalhadas do local. Estas técnicas têm em atenção as marcas de pneumáticos, os pontos de impacto, as posições finais e os danos aos veículos e os relatos de testemunhas, tendo sido aplicado o software de reconstrução SMAC (*Simulation Model of Automobile Collisions*), desenvolvido na Universidade de Cornell.

As velocidades de controle foram obtidas por medições de radares de velocidade feitas no mesmo local do acidente, com condições climáticas e de iluminação semelhantes, no mesmo período do dia e no mesmo dia da semana.

É importante destacar que um desvio da velocidade média elevado não significa uma velocidade absoluta extremamente elevada, e o aumento de 18% observado na figura 4 por um desvio de 30 Km/h pode ser causado por um veículo a deslocar-se a 60 Km/h em uma via com velocidade média de 30 Km/h, por exemplo. No estudo de Fildes, Rumbold e Leening (1991), esta distinção pode ser a explicação para a diferença nas frequências de acidentes observadas em estradas rurais e urbanas (cf. Fig. 1).

2.3. CLIMA E SEGURANÇA RODOVIÁRIA

2.3.1. PRECIPITAÇÃO

A literatura evidencia que diversos fatores climáticos têm influência sobre a segurança rodoviária, entretanto o fator que aparece com maior frequência em estudos é a precipitação, e as variáveis mais estudadas são a presença de chuva, a intensidade da chuva, e a presença de neve (Theofilatos e Yannis

2014). Os resultados dos estudos sobre a precipitação são consistentes, a maior parte conclui que a precipitação está associada a um aumento no número de acidentes.

A precipitação causa uma redução da segurança rodoviária por uma combinação de dois fatores: o primeiro a redução da força da aderência no contacto entre o pneumático e o pavimento, e o segundo a redução da visibilidade do condutor (Andrey e Yagar 1993). Destes dois fatores, observa-se que o primeiro tende a influenciar a frequência de acidentes mais do que a severidade destes, enquanto o oposto se observa para o segundo. A intensidade das chuvas, definida como a razão entre a quantidade de chuva que precipita e a respetiva duração, é de grande importância para a determinação do risco de acidente, visto que uma chuva mais intensa pode causar uma acumulação maior de água sobre a superfície da estrada, reduzindo ainda mais a aderência, e também uma maior redução de visibilidade, afetando ambas a frequência e a severidade dos acidentes.

Uma outra condição possivelmente agravante é a presença de poeira e resíduos da combustão de combustível acumulados sobre a superfície da estrada em períodos de seca, que, na ocorrência da “primeira chuva”, potencializam a redução da força de fricção. Keay e Simmonds (2006) observaram que o risco de acidentes aumenta em 3% com as primeiras chuvas depois de passados dois dias de tempo seco, e aumenta cerca de 9% se passados 20 dias. Posteriormente, Brijs, Karlis e Wets (2008) não encontraram evidências que confirmem este efeito, e concluíram que a intensidade de chuva é muito mais significativa.

Quanto ao efeitos da precipitação ao longo do tempo, o risco elevado de acidentes aparenta ser de efeito imediato, e o risco volta a níveis normais logo após o fim da precipitação (Andrey e Yagar 1993). Se considerada a hipótese da “primeira chuva” e para longos períodos de precipitação, é de se prever uma pequena redução do risco de acidentes com o tempo.

Os poucos estudos que apontam para um efeito nulo ou negativo da precipitação no número de acidentes ainda reportam alguma consistência com o restante da literatura, como a associação do pavimento molhado com os acidentes (Theofilatos e Yannis 2014). Yannis e G. Karlaftis em 2010 estudaram dados recolhidos diariamente durante um período de 21 anos em Atenas, Grécia, e concluíram que a precipitação reduz quer a frequência dos acidentes quer o número de fatalidades. Posteriormente Yannis (2014) nota que uma possível explicação da contradição é a reação adaptação ao clima por parte dos condutores, que na Grécia implica uma redução de velocidade, o que pode ser diferente de outros países devido à baixa frequência de precipitação no país. Esse comportamento de compensação aparece em outros estudos, mas não há um consenso sobre a magnitude deste efeito.

Assim, poder-se-á referir que enquanto a frequência dos acidentes é positivamente afetada pela precipitação, a gravidade dos acidentes não aparece com resultados consistentes na literatura. Alguns estudos apontam para um efeito nulo (Sherretz e Farhar 1978) ou para uma relação negativa (Theofilatos, Graham e Yannis 2012), enquanto outros concluem que o pavimento molhado aumenta o número de acidentes com vítimas mais do que o número de acidentes somente com danos aos veículos (Caliendo, Guida e Parisi 2007). Este fenómeno pode estar alinhado ao efeito de adaptação mencionado acima se for considerado o alto impacto da velocidade sobre a severidade dos acidentes.

Por último, refere-se que estudos que têm como foco a neve sugerem uma relação negativa com a frequência de acidentes. Um estudo feito na Dinamarca observou que o número de acidentes decresce em 1,2% para cada dia de neve adicional (Fridstrøm et al. 1995), o que também aponta para um efeito de compensação por parte dos condutores em reação ao clima. Também de forma similar à chuva, nos primeiros dias de neve o número de acidentes aumenta, embora esta variável tenha apresentado baixa

significância, e possa ser explicada também pela adaptação dos condutores em oposição a uma grande queda da aderência.

2.3.2. OUTROS FENÓMENOS CLIMÁTICOS

Os fenómenos climáticos que mais aparecem na literatura com exceção da precipitação são as neblinas, o vento e a temperatura do ar.

O número de estudos que incidem sobre o efeito da neblina em relação a segurança rodoviária é relativamente baixo. Destes estudos, observa-se que o que difere este fenómeno dos outros mencionados é que os acidentes que ocorrem sob influência de neblinas têm uma taxa de fatalidade notavelmente elevada, mas a frequência destes acidentes é reduzida (Al-Ghamdi 2007). Esta característica pode ser explicada pelos tipos de acidentes que se tornam mais prováveis nesta condição. Abdel-Aty et al. (2011) estudaram o impacto da baixa visibilidade causada por neblinas e nevoeiro em acidentes e observaram que a severidade aumenta conforme piora a visibilidade e que a maior parte dos acidentes nestas condições são colisões frontais ou traseiras, como seria expectável.

Estudos sobre os efeitos do vento na segurança rodoviária também são poucos, e a maioria destes estudos conclui que não há um efeito significativo do vento sobre os acidentes. Baker e Reynolds (1992) observaram num estudo que quase metade dos acidentes que ocorreram em tempestades no Reino Unido foram capotagens e que camiões com um “elevado gabarito” estavam envolvidos em 66% dos acidentes, sugerindo que o risco pode ser elevado especificamente nestes casos.

Não há um consenso quanto à influência da temperatura do ar sobre a segurança rodoviária. Alguns estudos apresentam evidências de que horas de sol e incidência de radiação solar podem aumentar o número de acidentes, outros concluem o contrário (Theofilatos e Yannis 2014). Pode haver algum efeito em relação ao local da estrada. Por exemplo, em uma região fria em que a neve desencoraja a circulação, o aumento da temperatura pode simplesmente aumentar também o número de veículos na estrada. O contrário pode ser verdade para países quentes e húmidos.

2.4. EFEITOS DA APLICAÇÃO DOS LIMITES MÁXIMOS VARIÁVEIS

Os sistemas VSL permitem uma gestão de tráfego inteligente que pode ser uma solução para os dois indicadores de risco associados à velocidade discutidos nos pontos anteriores bem como para os efeitos relativos às condições climáticas, nomeadamente a precipitação.

2.4.1. EFEITO SOBRE A VELOCIDADE DOS VEÍCULOS

Com relação à velocidade absoluta, uma alteração do limite máximo de velocidade só pode ter efeito sobre a velocidade média dos condutores na medida em que estes respeitam a sinalização. O aspeto mais importante neste caso é então proporção de condutores que respeitarão a sinalização implementada e as mudanças de limite de velocidade.

O estudo já citado anteriormente “*Speed Behaviour and Drivers’ Attitudes to Speeding*” (Fildes, Rumbold e Leening 1991) descreve o comportamento de condutores em estradas rurais e urbanas com relação à velocidade de condução e aos limites de velocidade.

De facto, em estradas rurais foram observadas velocidades excessivas em condutores jovens (menos de 34 anos de idade), condutores de veículos de fabrico recente, e em veículos com apenas um ocupante.

Estas variáveis podem estar correlacionadas ao motivo das viagens observadas. Condutores que viajavam em trabalho praticavam velocidades excessivas, enquanto os que viajavam em férias ou para fins domésticos respeitavam os limites máximos.

Os condutores entrevistados tanto em estradas rurais como em estradas urbanas foram capazes de identificar corretamente os limites de velocidade, e as velocidades em que conduziam não estavam significativamente relacionadas às estimativas dos limites máximos. Estes condutores podem ter a impressão de que o limite de velocidade não representa o real risco de acidente na estrada. De fato, os entrevistados que conduziam a velocidades elevadas consideraram a “velocidade segura” como mais alta do que os que conduziam a baixas velocidades.

Uma observação de grande interesse obtida no estudo das estradas rurais foi que a percepção da velocidade segura para a estrada “Euroa” foi muito mais elevada do que para a outra estrada, “Woodend”. Na primeira o condutor tem uma boa distância de visibilidade, enquanto na segunda existem muitas curvas e vegetação densa adjacente à estrada.

Deste modo, poder-se-á afirmar que o comportamento do condutor em relação a velocidade depende então tanto de características próprias do condutor como das características da estrada e a eficácia dos sistemas VSL pode ser maior em estradas em que estas características sejam consideradas de risco.

Há a possibilidade de que alguns tipos de sinalização tenham um maior efeito quando comparados a outros. Os sistemas de VSL são geralmente implementados com uso de sinalização eletrónica e com luz de LED em Painéis de Mensagens Variáveis. Os condutores podem respeitar mais este tipo de sinal por ser visualmente indicativo de uma situação extraordinária, em comparação com placas tradicionais de limite de velocidade. Se a sinalização for indicativa de que a mudança de velocidade imposta é resultado da situação em que a estrada se encontra em tempo real, o limite de velocidade pode ter maior credibilidade para os condutores.

Num estudo, Lee e Abdel-Aty (2008) mediram a conformidade de condutores com o limite de velocidade máxima variável utilizando um simulador virtual de condução. O indicador definido é a variação de velocidade dos condutores 200 m a jusante da sinalização de VSL. Um valor superior a 5 mi/h indica conformidade com o limite. O estudo concluiu que os condutores obedecem melhor a sinalização de velocidade em regime VSL do que em regime de limites máximos fixos, em especial quando é mostrada num painel eletrónico uma mensagem que indique que a razão da diminuição de velocidade é a redução do risco de acidente. Desta forma, os sistemas VSL podem ser utilizados como uma ferramenta a considerar para reduzir a velocidade média dos veículos numa estrada quando necessário.

2.4.2. EFEITO SOBRE A DISPERSÃO DAS VELOCIDADES ENTRE VEÍCULOS

O segundo aspeto (a dispersão de velocidades) também é afetado pelo uso de sistemas VSL, devido ao efeito de homogeneização das velocidades, tanto a velocidade de condução de um veículo individual ao longo de sua viagem como as velocidades entre veículos que percorrem o mesmo trajeto.

Num estudo de 2008, van Nes, Brandenburg e Twisk analisaram dados recolhidos de 46 participantes que conduziram por duas vezes em 12 secções de estradas diferentes em um simulador de condução, na primeira vez com sinalização de limites máximos de velocidade fixa, e na segunda com sinalização variável. As 12 secções são compostas de dois grupos idênticos de 6 secções, sendo a única diferença entre eles é que em um dos grupos há a presença de “situações perigosas”, uma a presença de neblina na estrada e a outra com tráfego intenso. Foram observados os desvios padrão da velocidade individual

de um participante em uma secção para todas as estradas e das velocidades dos participantes em uma secção.

Foi observada uma grande redução do desvio padrão da velocidade individual dos veículos quando aplicados os limites máximos variáveis em situações de perigo (Fig. 5), referindo-se que não houve uma diferença significativa para o desvio padrão das velocidades praticadas numa mesma secção.

Este resultado confirma um efeito positivo do uso de sistemas VSL e evidencia a tendência de condutores a respeitarem a sinalização conforme a sensação de perigo ou necessidade de redução de velocidade, como já referido.

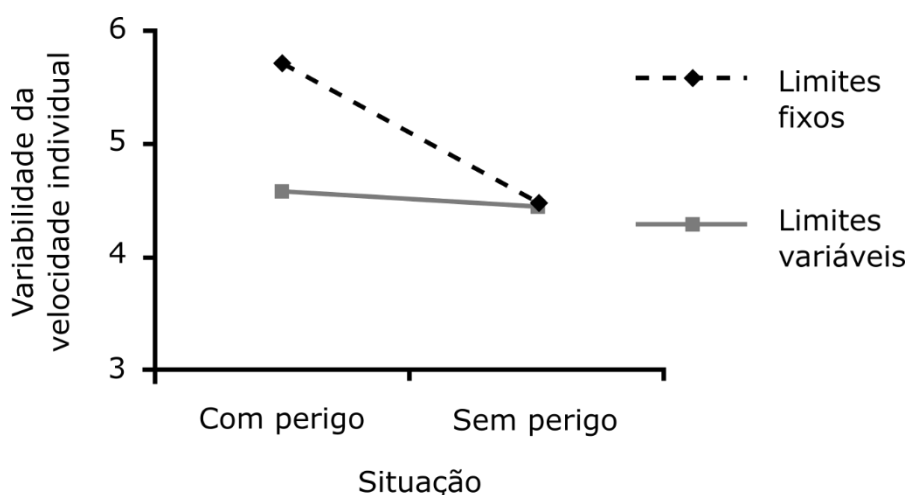


Fig. 5 – Efeito observado dos diferentes tipos de limite de velocidade (fixo e variável) na homogeneidade das velocidades de um condutor individual (adaptado de van Nes, Brandenburg e Twisk 2008b).

O estudo prossegue com uma avaliação do efeito de um sistema VSL de acordo com a sua sofisticação, nomeadamente considerando três níveis: sinalização tradicional, sinalização avançada com painel eletrónico (PMV) e sinalização avançada dentro do veículo (Fig. 6 – Níveis de sofisticação de sistemas de limites máximos de velocidade (adaptado de van Nes, Brandenburg e Twisk 2008b)). Dos resultados deste estudo é notável a redução dos desvios padrões das velocidades em situações perigosas conforme se aumenta a sofisticação do sistema de sinalização (Fig. 7), o que reforça a ideia de que os painéis eletrónicos comumente utilizados nos sistemas VSL são uma vantagem importante a ser explorada para a segurança rodoviária.

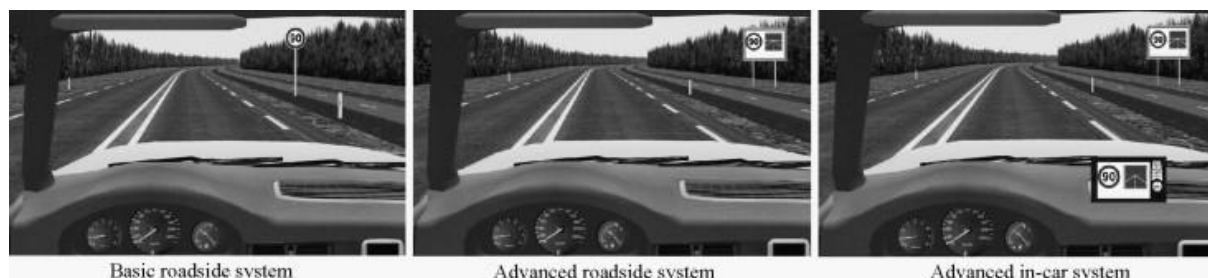


Fig. 6 – Níveis de sofisticação de sistemas de limites máximos de velocidade (adaptado de van Nes, Brandenburg e Twisk 2008b)

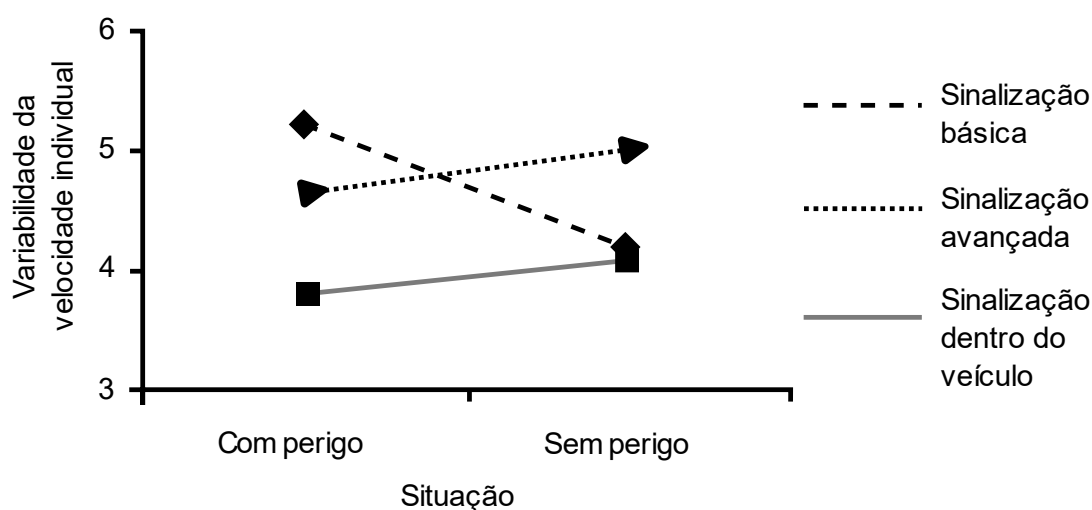


Fig. 7 – Efeito dos diferentes níveis de sofisticação das sinalizações dos limites máximos de velocidade (adaptado de van Nes, Brandenburg e Twisk 2008b).

2.4.3. EFEITO SOBRE OS VOLUMES DE TRÁFEGO

O comportamento de um fluxo de tráfego é regido por variáveis que são interdependentes que seguem a denominada Relação Fundamental (4). Estas variáveis são o débito (q), a concentração (k) e a velocidade média (u).

$$q(\text{veíc./h}) = k(\text{veíc./km}) \times u(\text{km/h}) \quad (4)$$

Esta relação pode ser reescrita de forma a evidenciar as interações entre a velocidade e a concentração (relação u - k), a velocidade e o débito (relação u - q) e o débito e a concentração (relação q - k). Quando representadas de forma gráfica, estas relações permitem uma compreensão intuitiva do funcionamento do fluxo de tráfego.

A relação q - k em particular é designada por diagrama básico de tráfego, por ser de grande utilidade em questões relacionadas ao controlo de tráfego. O débito aumenta com a concentração até atingir um valor máximo, que corresponde à passagem de um regime estável de tráfego para um regime instável, em que um número maior de veículos no espaço reduz o débito até que a corrente entra em regime de engarrafamento, com os veículos parados. Para cada ponto da curva há um vetor raio cujo declive corresponde à velocidade.

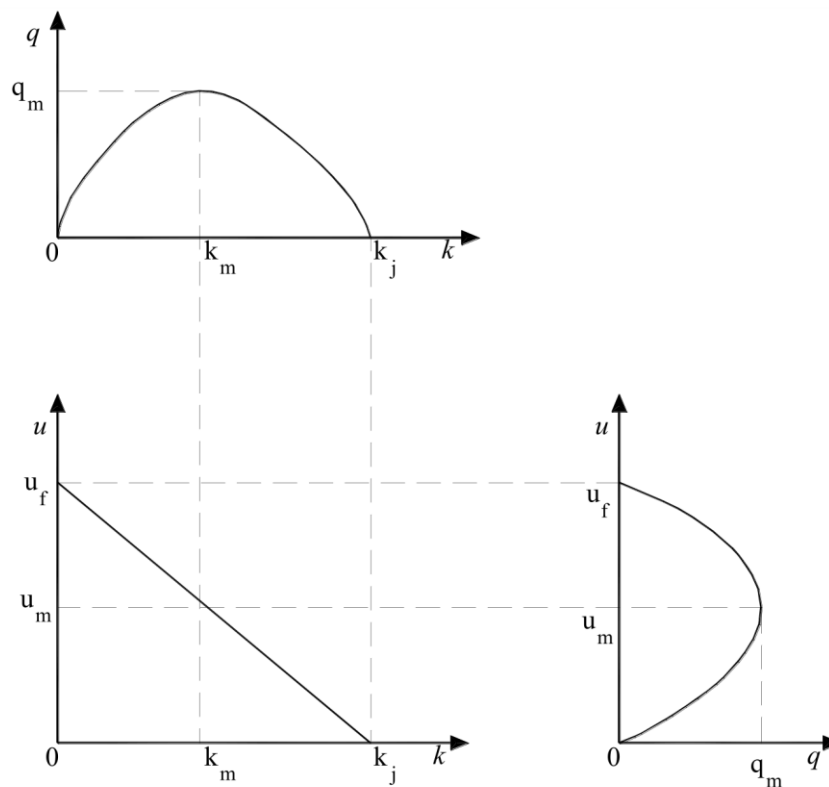


Fig. 8 – Relações entre as variáveis que descrevem uma corrente de tráfego através da Relação Fundamental.

Os cenários favoráveis para a aplicação de um sistema VSL com o objetivo de aumentar a eficiência do fluxo de tráfego são aqueles em que, mantendo-se constante o débito, a velocidade é reduzida para aumentar a concentração de veículos, como se pode observar no gráfico da relação u - k .

No trabalho de investigação de 2004, Hegyi estudou uma aplicação de um sistema VSL em conjunto com um sistema de *ramp-metering*, que é uma outra ferramenta de gestão inteligente de tráfego (controle dos ramos de entrada). O sistema VSL foi instalado à montante de um local sujeito a congestionamento, tendo Hegyi observado que o efeito da imposição de um limite de velocidade no diagrama básico de tráfego seria que a curva de regime estável muda de forma e passa a corresponder à reta cujo declive é a velocidade limite (Fig. 9).

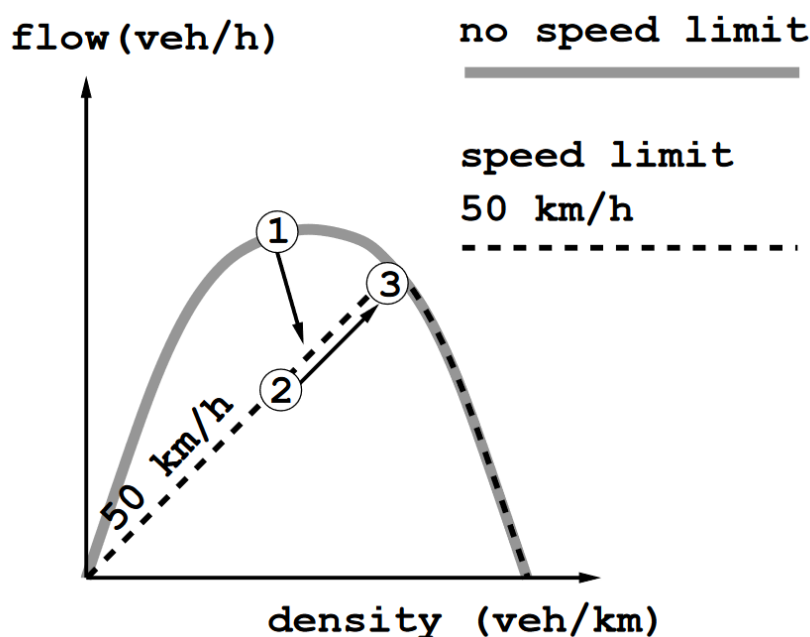


Fig. 9 – Diagrama básico de tráfego, em evidência o efeito da aplicação de um limite de velocidade (Hegyi 2004).

Quando a concentração se aproxima do valor crítico para qual o regime de funcionamento da corrente de tráfego passa a ser instável (situação 1 da Fig. 9), a redução da velocidade (situação 2 da Fig. 8 – Relações entre as variáveis que descrevem uma corrente de tráfego através da Relação Fundamental.) permite que a concentração possa aumentar conforme a procura para além do valor crítico sem o limite de velocidade, mas ainda em regime estável (situação 3 da Fig. 8).

Desta forma, espera-se que as reduções dos limites máximos de velocidade sirvam como ferramenta de dissipação de problemas de tráfego.

Por outro lado, a redução da velocidade de circulação dos veículos causa também uma perda de eficiência da autoestrada. Os tempos de viagem dos veículos aumentam conforme estas reduções também aumentam, o que limita a eficácia dos sistemas VSL.

Com respeito ao fluxo de tráfego, o sucesso da implementação do sistema VSL está atrelado ao equilíbrio entre estes dois aspetos controlados pelo limite máximo de velocidade.

2.5. EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

Há muitos exemplos de aplicação de sistemas dos sistemas VSL como uma ferramenta de gestão inteligente de tráfego em países europeus, em especial na Escandinávia e no Reino Unido, e nos Estados Unidos. A maior parte das aplicações tem como objetivo a melhoria do fluxo do tráfego, mas em regiões com condições climáticas adversas as vantagens deste tipo de sistema são já conhecidas.

Um estudo avaliou a resposta do condutor a limites máximos de velocidade que variavam de acordo com as condições climáticas locais em uma secção de 14 Km da estrada E18 na Finlândia por 1 ano (Rämä 1999). O estudo fez uso de 36 painéis de sinalização em LED (PMV) para reduzir a velocidade de 100 Km/h para 80 Km/h no inverno (mantida durante 20% do tempo de estudo) e de 120 Km/h para 100 Km/h (20% do tempo) ou 80 Km/h (3% do tempo) no verão. As velocidades e *headways* foram

obtidos de detetores *loop* e as condições climáticas de estações meteorológicas junto à estrada. Também existiam mensagens de “pista escorregadia” no inverno.

Os resultados foram reduções médias do desvio padrão das velocidades de 3,4 Km/h no inverno em relação às vias de controlo, com reduções mais significativas quando havia condições difíceis de se prever por parte do condutor (como exemplo, o gelo escuro). No verão as reduções foram menores, com uma diferença do desvio padrão médio de 2,1 Km/h.

Num estudo, Elvik (2013) analisou os impactos da aplicação de sistemas VSL na segurança em Oslo, Noruega. Estes sistemas foram aplicados com o objetivo de reduzir a poluição do ar, mas o estudo incidiu sobre as mudanças de velocidade e os números de acidentes antes e depois do início de aplicação destes sistemas. Os dados do estudo são as características do tráfego entre 1998 e 2004 (antes do sistema VSL) e entre 2004 e 2009 (depois da aplicação) de 3 estradas em Oslo: “European road 18”, “Ring 3 road” e “National road 4”.

Quando agrupados os resultados de todas as estradas, a redução do número de acidentes foi significativa em todos os cenários estudados. Os intervalos de confiança não foram uniformes, entretanto, com valores abaixo de 95% em casos em que a redução da frequência de acidentes foi de 48% e acima de 95% para reduções de 10% no número de acidentes.

O autor notou que as reduções de velocidade talvez não sejam suficientes para explicar a redução do número de acidentes, por serem de grandeza inferior ao que foi previsto (com recurso ao modelo *Power Model*, mencionado anteriormente) como necessário para causar os efeitos observados. Argumentou igualmente que podem existir outros factores que mudaram com o tempo entre 1998 e 2009.

2.6. VIABILIDADE ECONÓMICA

Segundo o *Washington State Department of Transportation* (WSDOT), os potenciais custos da implementação de sistemas VSL estão associados a:

- Análise operacional para o desenvolvimento de um algoritmo para a determinação dos limites máximos de velocidade;
- Análise legislativa para determinar se os limites recomendados pelo algoritmo são possíveis de implementar;
- Mecanismos legais para assegurar a obediência dos limites máximos;
- Distribuição de informação por canais mediáticos para educar a população sobre o novo sistema;
- Compra e instalação de painéis de mensagem variável para sinalizar os limites variáveis;
- Compra e instalação de sensores de tráfego e estações meteorológicas para a deteção de condições climáticas;
- Compra e manutenção de software de cálculo para os limites e de comunicação entre os equipamentos em campo;
- Manutenção de equipamentos de campo.

Esta lista não é exaustiva, situações particulares podem exigir mais custos específicos. Entre os itens listados estão custos iniciais e custos de exploração do sistema.

Em 2014, um programa piloto de sistemas VSL foi implementado em autoestradas do Texas, nos Estados Unidos, para avaliar a eficácia da redução dos limites de velocidade para lidar com congestionamentos, más condições climáticas, obras e outros fatores que podem afetar a segurança rodoviária.

Em 2017 foi publicado um relatório sobre os custos de implementação deste programa piloto ("Capital costs to install temporary Variable Speed Limit (VSL) systems in Texas ranged from \$91K to \$180K", 2017). Uma das aplicações foi a da estrada IH-35 em *Ranger Hill, Eastland County*, que esteve ativa entre julho de 2014 e janeiro de 2015 e teve como objetivo melhorar a segurança rodoviária em face a más condições climáticas. Os valores que constam no relatório estão representados na Tabela 1 – Caracterização dos custos de implementação do sistema VSL em *Ranger Hill*..

O programa teve caráter temporário e por isso os custos mensais de aluguer de equipamentos como os painéis de mensagem variável representam a maior parte dos custos totais. Num cenário de aplicação a longo prazo, os custos unitários de equipamentos mais robustos e permanentes devem ser maiores do que os custos apresentados no caso de *Ranger Hill*, o que significa que o custo inicial pode ser mais importante como fator de decisão na escolha da solução.

Tabela 1 – Caracterização dos custos de implementação do sistema VSL em *Ranger Hill*.

Equipamento	Quantidade	Custo unitário (US\$)	Custo mensal (US\$)	Custo total (US\$)
Painél de alerta	1	2708	2708	10832
Painél de VSL	4	3227	12908	51632
Detetor de veículos	4	5500	0	22000
Sensore de visibilidade	1	5224	0	5224
Sensor de condições climáticas	1	11315	0	11315
Outros custos	1	7500	0	7500
Total				108503

Os sistemas VSL podem ser muito mais complexos do que o sistema implementado em *Ranger Hill*, e conforme se aumenta a complexidade do sistema, mais equipamentos e manutenção são necessários, o que pode elevar muito o custo total de implementação.

Segundo o governo da província de *British Columbia*, Canadá, o custo total de implementação dos sistemas VSL das autoestradas 1 e 3 foi de 25 milhões de dólares canadianos em 2020. No caso da autoestrada 1, a implementação do sistema incluiu sensores de tráfego posicionados a cada 500 m dos 31 Km entre *Sumas River Bridge* e *Prest Road*, além de 20 painéis de limites máximos variáveis em cada sentido de circulação e múltiplos sensores que medem o nível de atrito, a visibilidade, a temperatura e a condição da pista (seca ou molhada).

A forma de implementação do sistema VSL, no que se refere ao número de sensores, painéis e outros equipamentos, é, então, um fator de grande importância a se considerar para a decisão de adoção deste tipo de solução.

3

METODOLOGIA E CASO DE ESTUDO

3.1. ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi feito sobre um sublanço da autoestrada A7 da Concessão Norte de Portugal, operada pela empresa Ascendi, que liga Póvoa do Varzim a Vila Pouca de Aguiar. O sublanço em estudo é a ligação entre Ribeira de Pena e Vila Pouca de Aguiar, nos últimos quilómetros da autoestrada, entre o PK 89 e o PK 104, uma região montanhosa junto à Serra do Alvão.

O sublanço foi escolhida principalmente por ter sido identificado como pertencente a uma região de precipitação intensa, com uma média anual histórica de 1724 mm e precipitações horárias podendo chegar a mais de 40 mm (Dados de base do SNIRH, 2022). Como referência, as precipitações anuais médias de Lisboa e do Porto são 766 mm e 1143 mm, respetivamente.

Situada aproximadamente ao centro do sublanço está a estação meteorológica de Santa Marta da Montanha, que faz parte da rede do Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (SNIRH), o que permite a recolha de dados climáticos relevantes à escala local. Outra característica importante da estrada neste sublanço é a geometria de fácil modelação e recolha de dados, com curvas de grande raio e somente os nós de início e fim do sublanço.



Fig. 10 – Mapa da região da autoestrada A7, destacada em azul. Adaptado de Map data ©2022 Inst. Geogr. Nacional.

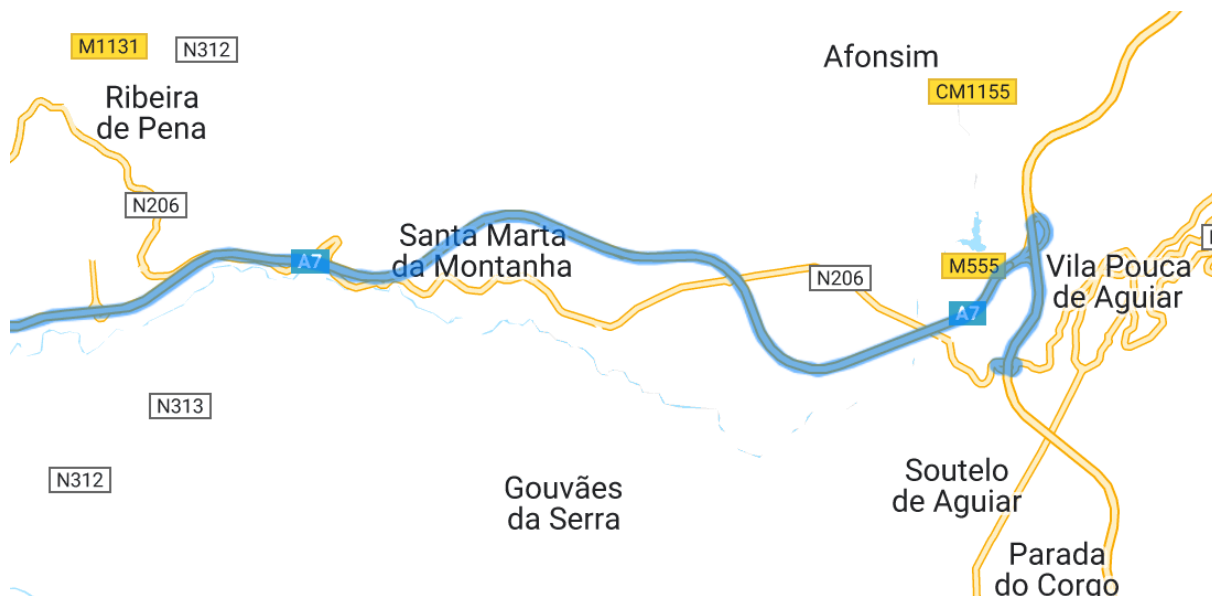


Fig. 11 – Mapa do sublanço estudado, entre Ribeira de Pena e Vila Pouca de Aguiar A7, destacada em azul.

Adaptado de Map data ©2022 Inst. Geogr. Nacional.

3.2. METODOLOGIA

A análise da aplicabilidade de sistemas VSL foi feita em duas partes, a primeira o desenvolvimento de um modelo de previsão de acidentes para melhor compreender o efeito da precipitação sobre o risco de acidentes na estrada onde se pretende aplicar o sistema e a segunda uma modelação microscópica do tráfego com as mudanças de limite de velocidade máxima que o sistema VSL deve impor aos condutores.

Os objetivos principais da primeira parte são obter uma melhor compreensão dos efeitos que as condições climáticas adversas têm sobre o risco de acidentes no local e determinar a quantidade de chuva que representa um risco elevado de acidente, o suficiente para servir de gatilho para a mudança do limite máximo de velocidade. A escolha deste gatilho não é inteiramente objetiva, e depende do nível de risco considerado aceitável para o gestor da infraestrutura e como este pretenderá balancear este risco com o tempo de percurso dos veículos, que deve ser reduzido conforme também se reduz o limite máximo de velocidade.

Na segunda parte pretende-se analisar o comportamento do tráfego e a mudança de desempenho da autoestrada quando aplicado o sistema VSL, nomeadamente no que se refere à velocidade dos veículos e aos tempos de viagem. Da simulação são extraídas as velocidades individuais, a variância das velocidades e os intervalos entre veículos (*headways*).

Para a comparação dos resultados referentes aos diferentes cenários de aplicação, foram seleccionados os seguintes indicadores:

- Desvio padrão da velocidade média da secção de medição [Km/h]. Representa a variabilidade da velocidade praticada pelos condutores. Quanto menor este valor, maior a segurança.
- Desvio padrão da distância entre veículos que passam na secção de medição em sequência (*headways*) [m]. Representa a variabilidade da disposição dos veículos no espaço. Quanto menor este valor, maior a segurança.

- Tempo de viagem no sublanço [s]. Representa a eficiência do tráfego no sublanço em estudo. Quanto menor este valor, mais eficiente o tráfego.

3.3. MODELO DE PREVISÃO DE ACIDENTES

Na literatura sobre segurança rodoviária há uma carência de estudos que incidem sobre as variáveis climáticas como fator de risco, e um número menor destes que relacionem estas variáveis com a velocidade no contexto da prevenção de acidentes.

Desta forma, para melhor compreender os efeitos de condições climáticas adversas, em especial na área de estudo, bem como para a definição de um valor alvo para a escolha da amplitude de variação dos limites máximos de velocidades que seriam utilizados num sistema VSL para o local, foi desenvolvido um modelo simples, mas específico, descrito nos pontos seguintes.

3.3.1. DESCRIÇÃO DAS VARIÁVEIS

Os dados de partida do modelo são os acidentes ocorridos no período entre 2016 e 2022, registados pela empresa Ascendi, numa secção da autoestrada A7 entre Cabeceira de Bastos (Km 76) e Vila Pouca de Aguiar (Km 104) e as condições climáticas obtidas de estações meteorológicas mantidas pelo Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (SNIRH) para o mesmo período de tempo.

Observa-se que a secção em que os dados de acidentes foram recolhidos é composta pelo sublanço em estudo por simulação microscópica e um sublanço adjacente. A razão desta composição é que o número de acidentes ocorridos apenas no primeiro sublanço foi considerado pequeno, mas com a adição do segundo atingiu-se o número de 248, de grandeza equivalente a utilizada em estudos similares (Yu e Abdel-Aty 2014).

As condições climáticas observadas são a precipitação horária e a velocidade do vento horária, que são os únicos dados que a estação meteorológica de Santa Marta da Montanha recolhe. A precipitação em especial é de grande interesse por ser muito frequente na área de estudo.

A precisão horária foi escolhida para melhor compreender o impacto imediato do início de precipitação no número de acidentes e para que o resultado seja compatível com a operação de mudança gradual do limite máximo de velocidade no tempo, seguindo a recomendação feita em estudo por Abdel-Aty, Dilmore e Dhindsa (2006). As chuvas intensas causam efeitos muito maiores em intervalos de tempo relativamente curtos, e parte destes efeitos cessam imediatamente após o término da chuva (a redução de visibilidade, por exemplo).

Como discutido em secções anteriores desta dissertação, a velocidade no vento não é usualmente considerada importante como previsor de acidentes, mas foi incluída no modelo de forma a torná-lo mais robusto, ainda que permaneça um modelo simples.

Foi considerada a possibilidade de haver correlação entre as variáveis precipitação e velocidade do vento, porque podem comportar-se de forma semelhante em fenómenos como tempestades. Entretanto, quando calculado o coeficiente de correlação de Pearson entre estas variáveis chegou-se ao valor 0,241, positivo, mas pequeno o suficiente para indicar uma correlação desprezável.

Nas tabelas seguintes apresentam-se as descrições estatísticas das variáveis utilizadas para a modelação.

Tabela 2 – Descrição da precipitação horária registada entre 2016 e 2022 pela estação meteorológica de Santa Marta da Montanha.

Núm. de observações	45420
Média	0,138 mm
Mediana	0,000 mm
Moda	0,0 mm
Desv. Padrão	0,6331 mm
Mínima	0,0 mm
Máxima	44,8 mm

Tabela 3 – Descrição da velocidade do vento horária registada entre 2016 e 2022 pela estação meteorológica de Santa Marta da Montanha.

Núm. de observações	45420
Média	1,704 m/s
Mediana	1,500 m/s
Moda	0,0 m/s
Desv. Padrão	1,5461 m/s
Mínima	0,0 m/s
Máxima	14,0 m/s

Tabela 4 – Descrição dos acidentes ocorridos entre 2016 e 2022 na autoestrada A7 entre Cabeceira de Basto e Vila Pouca de Aguiar.

Núm. de observações	45420
Núm. Total de acidentes	248
Média	0.005
Mediana	0
Moda	0
Desv. Padrão	0.0785
Mínimo	0
Máximo	2

3.3.2. ESCOLHA DO MÉTODO DE MODELAÇÃO

As técnicas de análise de segurança rodoviária mais utilizadas na literatura são modelos generalizados de regressão linear, como a regressão de Poisson e a regressão Binomial Negativa.

Para que o modelo de Poisson seja aplicável, o valor da média tem que ser igual ou muito próximo do valor do desvio padrão, o que não ocorre para a variável dependente em estudo (número de acidentes).

Nestes casos, pode ser aplicável a regressão binomial negativa, porém, devido à escala temporal utilizada e ao grande número de horas observadas, a maior parte das observações não apresenta acidentes, e, nas poucas horas em que acidentes ocorrem, poucos casos são observados para a secção em estudo. Este problema deve ser encontrado mesmo em autoestradas com maior tráfego de veículos, pelo que para a reprodução do modelo para este e outros estudos um modelo de contagem não se aplica bem.

Foi então criada uma variável binária que apenas representa a ocorrência ou não de um acidente na hora observada. Desta forma é possível fazer uma regressão binária logística. Em um estudo recente Caliendo, Guida e Parisi (2007) observaram que a capacidade explanatória de modelos com variável nominal e distribuição Logit foi maior do que os modelos de contagem (Poisson e Binomial Negativa), o que reforça a escolha do modelo.

Em estatística, o modelo logístico modela a probabilidade de um evento (entre duas alternativas) acontecer, tendo em consideração que os logaritmos das chances de acontecimento são uma combinação linear de uma ou mais variáveis independentes. A regressão logística é a estimação dos coeficientes do modelo logístico.

A função de probabilidade logística é

$$P(Y = 1) = \frac{1}{1 + e^{-g(x)}} \quad (5)$$

Em que

$$g(x) = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_n X_n \quad (6)$$

E em que β_i são os coeficientes do modelo e X_i são as variáveis independentes. Os coeficientes são estimados a partir do método da máxima verossimilhança, em que há uma combinação de coeficientes que maximiza a probabilidade da amostra ter sido observada. A curva da função logística tem um comportamento probabilístico no formato da letra “S”, com assíntotas horizontais em 0 e 1.

O modelo foi criado com o software de análise SPSS Statistics da empresa IBM, em sua versão 28.0.

3.3.3. RESULTADOS

Tabela 5 – Resultados e coeficientes do modelo de previsão de acidentes.

	β	Desv. padrão	Sig.	Exp(β)
Constante	-5,458	0,0999	0,000	0,004
Precipitação	0,106	0,0396	0,007	1,112
Vel. do vento	0,084	0,0385	0,028	1,088

Para a validação do modelo foi feito o teste de Omnibus, que faz uma comparação entre os ajustes do modelo com e sem a inclusão das variáveis independentes de previsão, neste caso a precipitação e a velocidade do vento, sendo a hipótese nula a de que o ajuste do modelo sem previsores é igual ao ajuste do modelo com previsores. O teste rejeitou a hipótese nula, com nível de significância a 0,007.

Se forem inseridos os valores da Tabela 5 na equação do modelo (6), chega-se ao modelo de previsão encontrado:

$$g(x) = -5,458 + 0,106 \cdot X_{precipitação} + 0,084 \cdot X_{vento} \quad (7)$$

Com atenção à coluna “Exp(β)” da Tabela 5, referente à exponencial do parâmetro β , observa-se que um aumento de 1 mm de precipitação em uma hora aumenta a probabilidade de ocorrência de um acidente em 11,2%. Um dia de precipitação particularmente intensa pode facilmente acumular mais de 5 mm em uma hora, o que representaria um aumento relativo do risco de acidente de 70%.

A velocidade do vento tem um efeito menor, mas ainda significativo, e para cada 1 m/s adicional à velocidade do vento o risco de acidentes aumenta em 8,8%.

3.4. SIMULAÇÃO DE TRÁFEGO

3.4.1. MODELOS MICROSCÓPICOS

A simulação de tráfego é uma ferramenta muito importante para o desenvolvimento de pesquisas que incidem sobre a alteração de elementos de tráfego que podem trazer consequências não antecipadas se testadas diretamente em ambiente real de projeto. Sobretudo, as simulações permitem rapidamente testar diversos cenários de aplicação e, portanto, adiantam a aquisição de dados em quantidade suficiente para validar um estudo.

Os modelos de simulação de tráfego são categorizados de acordo com o nível de detalhe ou escala temporal de simulação:

- Modelos sub-microscópicos: maior nível de pormenorização, procurando simular quer o funcionamento de partes do veículo quer o comportamento do condutor (“agentes”);
- Modelos microscópicos: os veículos e os seus comportamentos são únicos e diferentes entre si, requerendo mais dados e tempo de codificação do que modelos menos detalhados;

- Modelos mesoscópicos: nível intermédio de detalhe, não simulam veículos individualmente, mas sim como grupos;
- Modelos macroscópicos: simulam o tráfego como um todo, recorrendo às denominadas variáveis macroscópicas (débito, concentração e velocidades médias no espaço).

O comportamento dos condutores e dos veículos inseridos na simulação pode ser modelado de duas formas distintas:

- Determinística: o comportamento dos veículos e das variáveis é analiticamente determinado.
- Estocástica: há aleatoriedade programada no comportamento dos veículos e variáveis de simulação.

Para estudos sobre a segurança rodoviária, os indicadores mais importantes são recolhidos em escala microscópica, e torna-se importante o fator aleatório no comportamento das entidades simuladas.

3.4.2. MODELO VISSIM

O software VISSIM do grupo PTV é uma ferramenta muito utilizada para a modelação microscópica e na engenharia de tráfego. O software permite codificar uma secção de uma autoestrada com características geométricas e comportamentais bem detalhadas. O programa é suportado por softwares de desenho e de mapeamento, bem como interfaces de comunicação com serviços de localização e com ambientes de programação para configurar comportamentos específicos.

O modelo de corrente de tráfego é baseado no modelo de *car following* desenvolvido por Wiedemann em 1974, e integra características físicas da estrada e do tráfego com a perceção e a psicologia do condutor simulado (Fig. 12).

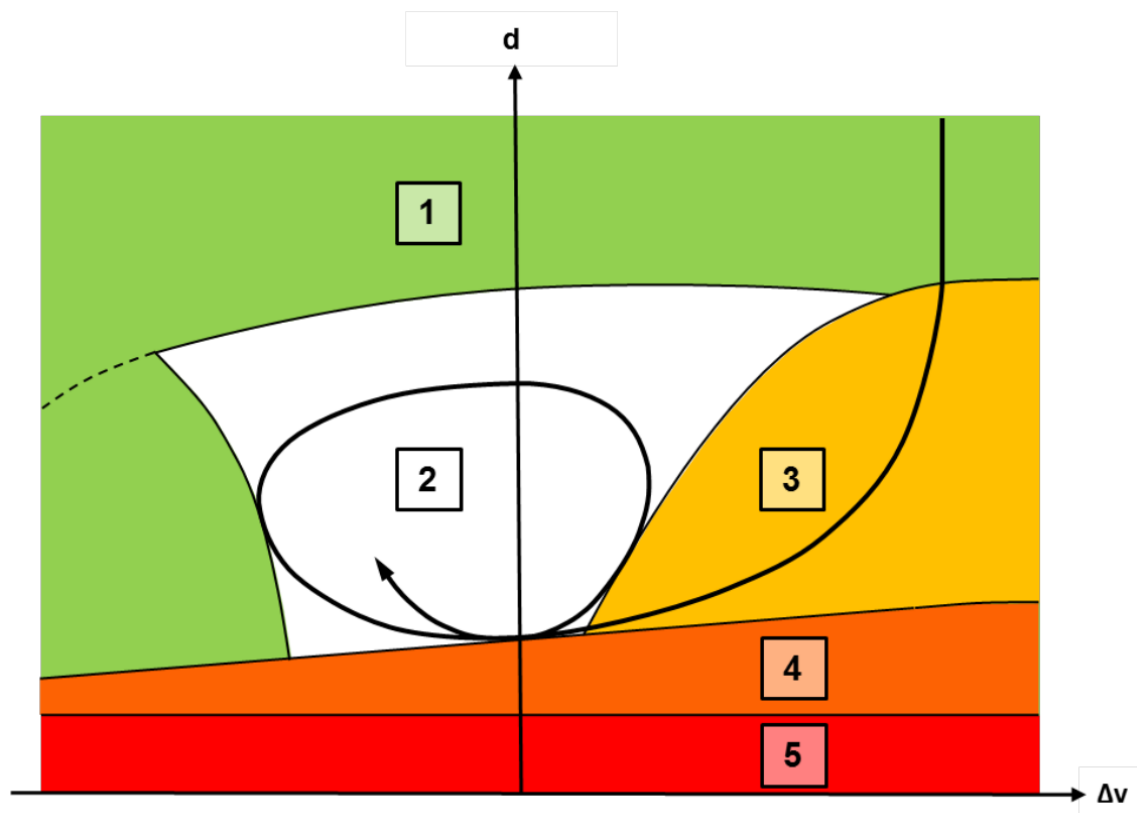


Fig. 12 – Modelo de *car following* de Wiedemann (1974). 1: Estado de “comportamento desregulado”. 2: Estado “following”. 3: Estado de “aproximação”. 4: Estado de “frenagem”. “d”: distância. Δv : variação de velocidade.

Adaptado do manual do utilizador VISSIM 2020.

De forma simplificada, o modelo funciona desta forma: um condutor, que de início está no estado “desregulado” que desenvolve uma velocidade maior do que a de um veículo que está à sua frente começa a desacelerar no momento em que este veículo se aproxima do limiar de percepção individual do condutor (estado de “aproximação”). Como o condutor não tem a capacidade de determinar a velocidade real do veículo à sua frente, ele desacelera para uma velocidade inferior à deste veículo, e volta a acelerar quando o veículo não está mais dentro do seu limiar de percepção (estado “following”, em que o condutor reage ciclicamente ao veículo que o precede).

Funções de distribuição da aceleração e da velocidade entre condutores são considerados para criar um comportamento individual de um condutor, tornando a simulação mais complexa. O condutor pode ainda assumir o estado de “travagem”, se perceber uma situação de perigo, ou o de “colisão”, se o perigo não for evitado.

Dentro do programa, todos os aspetos relacionados com a infraestrutura e com os veículos objeto do modelo de simulação são representados como entidades (“*traffic objects*”) com atributos individuais que configuram o funcionamento da rede de tráfego e o comportamento dos condutores. A modelação pode incluir ou excluir atributos destas entidades conforme necessidade, podendo o modelo ser mais ou menos complexo. Também podem ser criados novos atributos, com fórmulas que podem ser dependentes de outras entidades ou atributos preexistentes.

3.4.3. RECOLHA DE DADOS E CARACTERIZAÇÃO DO SUBLANÇO DE ESTUDO

Os dados utilizados neste estudo têm origem nas bases de dados que a empresa Ascendi mantém para a gestão da Concessão Norte, na qual está situada a autoestrada A7. Também foram recolhidos dados diretamente da autoestrada, com o objetivo de se obter dados de entrada mais precisos para a calibração do modelo de simulação microscópica.

Foram posicionados dois radares de contagem automática do modelo “Viacount II”, produzido pela empresa Via Traffic Controlling, no Pk 96 da autoestrada A7, um para a faixa de rodagem do sentido crescente e outro para o sentido decrescente de quilometragem. O limite máximo de velocidade atual neste local é de 120 Km/h. O local foi escolhido por estar numa região relativamente plana e distante de curvas, áreas de serviço e outros elementos que possam influenciar a velocidade de tráfego escolhida pelo condutor. O radar esteve a recolher dados entre os dias 20 e 23 de junho de 2022, e permitiu obter as seguintes variáveis:

- volume de tráfego discriminado por veículos ligeiros e pesados;
- velocidade individual de cada veículo;
- intervalo de tempo entre veículos



Fig. 13 – Radar modelo Viacount II posicionado no PK 96 da autoestrada A7 para recolher dados de tráfego.

Nas tabelas e figuras seguintes apresenta-se um resumo decorrente dos dados recolhidos.

Tabela 6 – Descrição do tráfego da autoestrada A7, PK 96. Medições feitas com radar automático.

Sentido	Veículos acima do limite de velocidade	Intervalo médio entre veículos	TMD
Crescente	21,05%	42,68 s	1819 veíc.
Decrescente	57,87%	42,56 s	1927 veíc.

Tabela 7 – Descrição das velocidades medidas com radar automático na autoestrada A7, PK 96.

Tipo de veículo	Sentido	Contagem	Vel. média	Vel. mínima	Vel. máxima	Vel. percentil 85	Desv. padrão
Ligeiros	Crescente	4517	113 Km/h	34 Km/h	188 Km/h	130 Km/h	16 Km/h
Ligeiros	Decrescente	4899	131 Km/h	38 Km/h	205 Km/h	148 Km/h	17 Km/h
Pesados	Crescente	562	97 Km/h	53 Km/h	138 Km/h	113 Km/h	16 Km/h
Pesados	Decrescente	480	97 Km/h	69 Km/h	173 Km/h	102 Km/h	23 Km/h

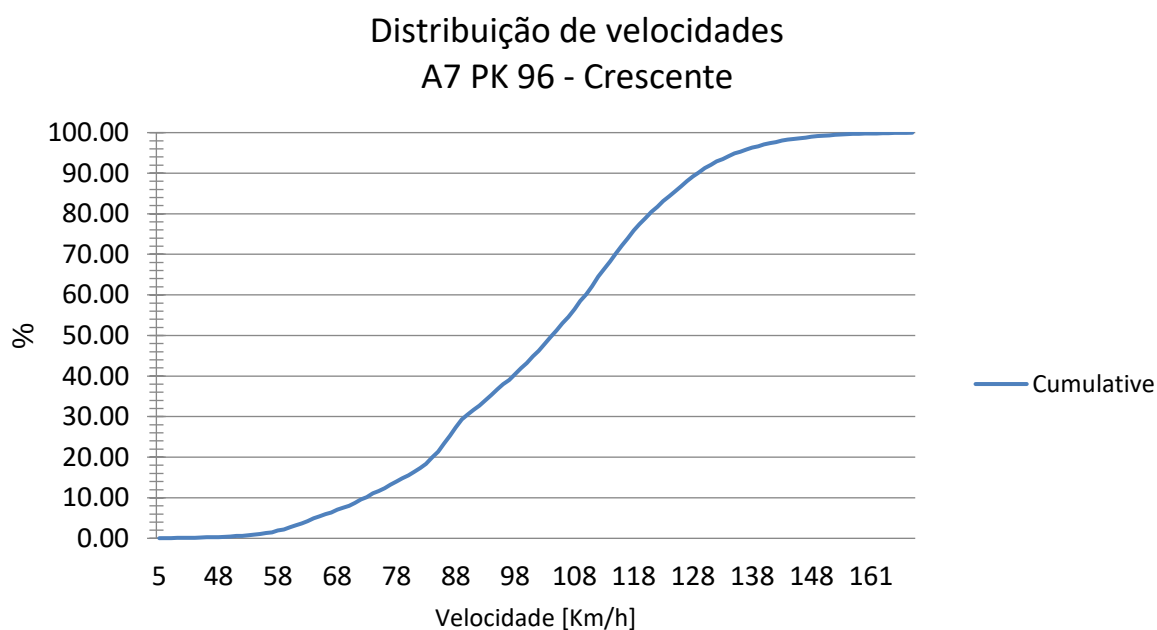


Fig. 14 – Distribuição das velocidades medidas com radar automático na autoestrada A7, PK 96, sentido crescente.

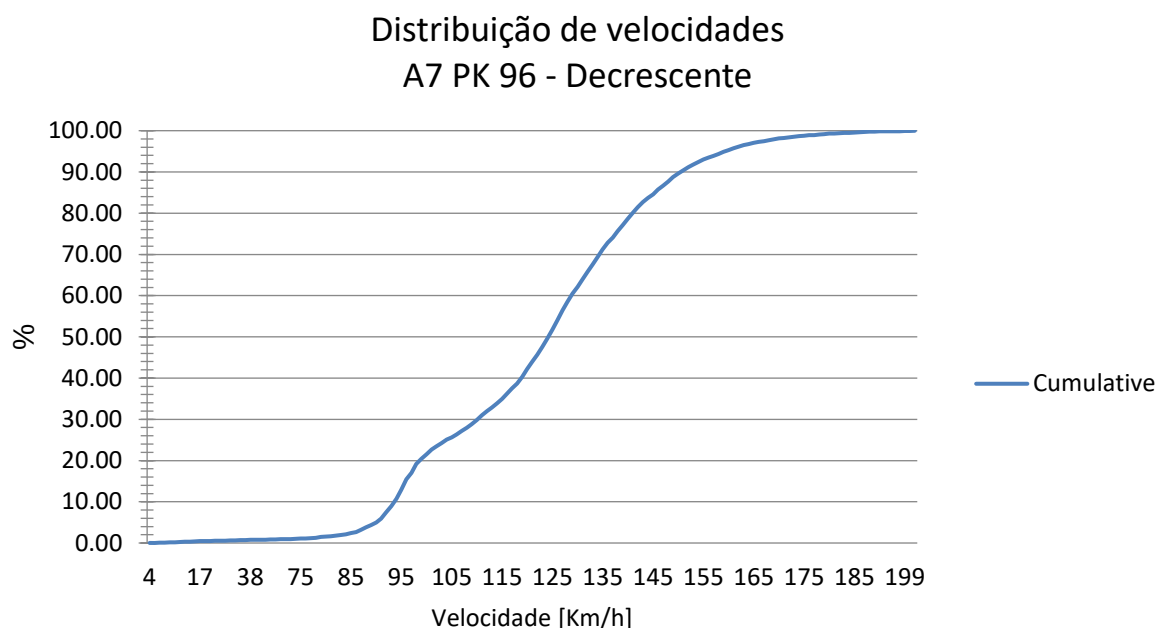


Fig. 15 – Distribuição das velocidades medidas com radar automático na autoestrada A7, PK 96, sentido decrescente.

3.4.4. CONSTRUÇÃO DA REDE

O programa permite utilizar projeções de satélite recolhidas do serviço Bing Maps da Microsoft ou projeções esquemáticas do serviço de conteúdo livre OpenStreetMap (OSM). Com o uso das projeções de satélite a uma escala suficientemente grande, é possível desenhar o traçado da estrada com uma adequada semelhança à real através da criação de um grafo de rede (arcos – *links*). Os arcos são objetos que representam faixas de rodagem de segmentos de estrada com atributos relacionados à geometria da estrada e ao comportamento dos condutores.

O modelo deste estudo possui 4 arcos, sendo 2 relativos ao sentido crescente dos Km e outros dois relativos ao sentido decrescente. A diferença entre os arcos associados ao mesmo sentido é o declive da autoestrada, que foi estimado com recurso aos mapas de relevo disponíveis no serviço Google Maps. Cada sentido tem um total de 13,12 Km (Tabela 8).

O comportamento dos condutores escolhido foi o “*Freeway*”, adequado a autoestradas e equivalente ao modelo *Widemann 99 Car Following Model*.

Tabela 8 – Links da rede de modelação no VISSIM.

Link	Sentido	Comprimento	Comportamento	Vias	Largura das vias	Declive
1	Crescente	8,86 Km	Freeway	2	3,75 m	3,5 %
2	Crescente	4,25 Km	Freeway	2	3,75 m	0 %
3	Decrescente	8,86 Km	Freeway	2	3,75 m	-3,5 %
4	Decrescente	4,25 Km	Freeway	2	3,75 m	0 %



Fig. 16 – Rede de tráfego utilizada nas simulações. Representado em amarelo o desenho dos arcos da rede.

3.4.5. CALIBRAÇÃO DO MODELO

Com o traçado da estrada codificado (rede), os dados relacionados ao tráfego (procura) são adicionados ao simulador. Como estavam disponíveis dados de medições a longo prazo e dados recentes recolhidos pelos radares instalados, partes destas duas bases foram utilizadas conforme se julgou mais adequado para diferentes parâmetros de simulação.

Para o limite máximo de velocidade em prática na autoestrada A7 (120 Km/h) foram utilizados os dados recolhidos pelos radares instalados para chegar a distribuição de velocidades a ser implementada no simulador. Para os outros limites de velocidade testados neste estudo, foi utilizada a distribuição Normal, por ser desconhecida a distribuição real. Abdel-Aty e Yu analisaram no estudo de 2014 a qualidade de ajuste das distribuições Normal, Exponencial, Gama, Log-normal e Weibull, e a distribuição Normal teve um resultado satisfatório.

O volume de tráfego adotado foi estimado com base nos dados relativos ao ano de 2019. Estes dados representam melhor o tráfego real de circulação se considerado o pequeno intervalo de tempo que o radar esteve em funcionamento. A pandemia que teve grandes impactos em 2020 pode ainda ter influência no volume de tráfego por poder alterar regimes de trabalho e hábitos dos condutores do local.

Como os dados de 2019 relativos ao volume são apresentados em forma de Tráfego Médio Diário Anual (TMDA) e o modelo requer o volume de tráfego horário para a simulação, uma estimativa foi feita para extrair o Volume Horário de Projeto (VHP) com uso de um fator de ajuste K, que para este caso em que se estuda uma estrada turística em zona rural, assume o valor 0,15. Este VHP é ainda ajustado para cada sentido com um fator de distribuição D que assume o valor 0,64 para um sentido, arbitrado o decrescente, e 0,36 para o outro sentido. Estes coeficientes estão de acordo com diretrizes estipuladas no livro *Traffic*

Engineering Handbook (Pande e Wolshon 2016) e são utilizados com frequência em situações semelhantes e para dimensionamento de estradas.

$$VHP_s = TMDA \times K \times D \quad (8)$$

$$VHP_{crescente} = 5036 \times 0,15 \times 0,36 \cong 272 \text{ veíc.}$$

$$VHP_{decrecente} = 5036 \times 0,15 \times 0,64 \cong 483 \text{ veíc.}$$

Da base de dados de 2019 também foi obtida a composição do tráfego no que se refere ao tipo de veículo, para este estudo apenas dividida entre veículos ligeiros, que compõem 87% do tráfego, e veículos pesados (13%).

Os restantes dados de entrada utilizados para a simulação são as recomendações do manual do VISSIM que estão selecionados por defeito e não são específicos para o caso em estudo.

3.4.6. CENÁRIOS

Um dos objetivos deste trabalho é definir a fase de transição para a alteração dos limites de velocidade, ou seja, definir qual a melhor forma para apresentar a alteração dos limites de velocidade aos condutores com relação aos indicadores de segurança e de eficiência do tráfego.

Para o estudo de caso, foram definidos sete cenários diferentes para poder avaliar a diferença dos efeitos do sistema VSL quando os limites de velocidade são reduzidos de forma imediata, ou seja, com a mudança a acontecer instantaneamente em somente um local de sinalização, de forma gradual no tempo também em um único local ou de forma gradual no espaço e distribuída em múltiplos locais, mantendo-se todos os outros parâmetros para os restantes cenários.

O cenário 1 é o cenário base, representando a situação atual de limite máximo de velocidade, codificado com o objetivo de caracterizar a situação de controlo para comparação com os restantes cenários.

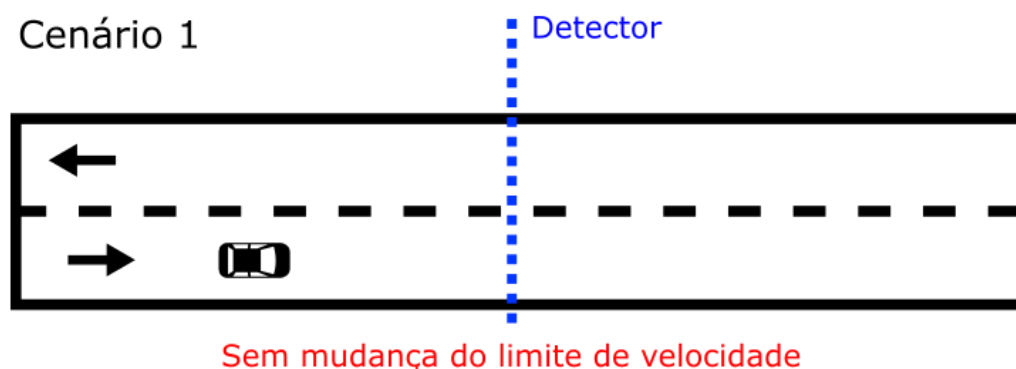


Fig. 17 – Esquema ilustrativo do cenário 1 de simulação.

No cenário 2, uma mudança do limite de velocidade de 120 Km/h para 100 Km/h acontece a 2 Km do ponto de entrada de veículos na simulação (PK 91 para o sentido crescente e PK 102 para o decrescente). Numa situação real de aplicação, para reduzir o risco de acidente por fenómeno climatérico seria delimitado um segmento com início e fim de acordo com observações destes dados climatéricos, observando-se que na simulação realizada o tamanho de um segmento com estas características não seria bem caracterizado. Desta forma, apenas o ponto em que o limite máximo de velocidade é reduzido é simulado. Pontos de recolha de dados semelhantes a aparelhos de deteção do tipo *loop* são instalados a 1 Km do ponto de mudança de velocidade, distância considerada suficiente para a reação do condutor, tendo em consideração a forma como o modelo VISSIM simula o comportamento de condutores frente a sinalização de limite de velocidade.

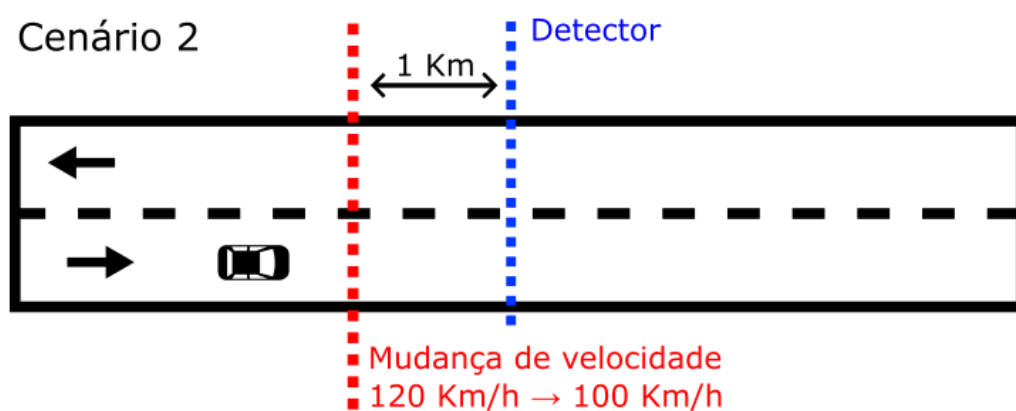


Fig. 18 – Esquema ilustrativo do cenário 2 de simulação.

Para o cenário 3, em ambas as faixas de rodagem, além do mesmo ponto de mudança de limite de velocidade implementado no primeiro cenário, um ponto adicional é implementado a 3 Km do ponto de entrada de veículos (Km 92 para o sentido crescente e 101 para o decrescente). A mudança de velocidade neste caso deve ser gradual, com uma distância de 1 Km entre placas de sinalização. Os pontos de recolha de dados são colocados a 1 Km destes novos pontos de mudança de limite de velocidade.

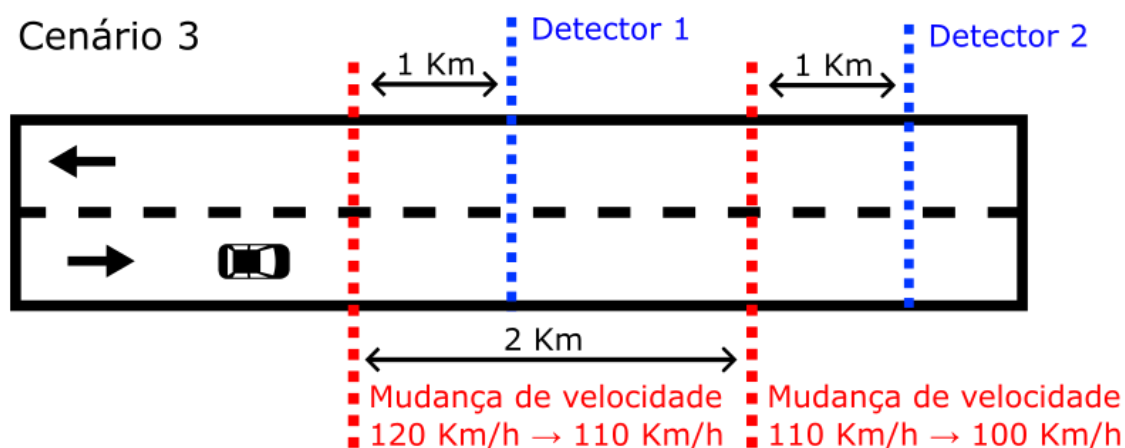


Fig. 19 – Esquema ilustrativo do cenário 3 de simulação.

No quarto cenário também há uma mudança gradual do limite máximo de velocidade, mas esta mudança é feita somente com um ponto de sinalização, e o limite varia com o tempo, não com o espaço. As localizações dos pontos mudança de velocidade e de recolha de dados são iguais às do cenário 2.

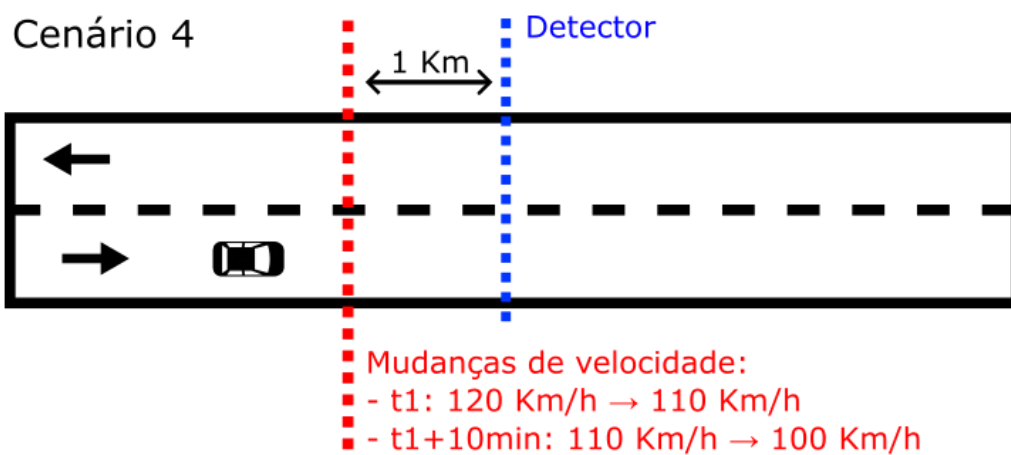


Fig. 20 – Esquema ilustrativo do cenário 4 de simulação.

Os restantes cenários são repetições dos cenários 2, 3 e 4, encontrando-se a diferença na amplitude da variação do limite máximo de velocidade.

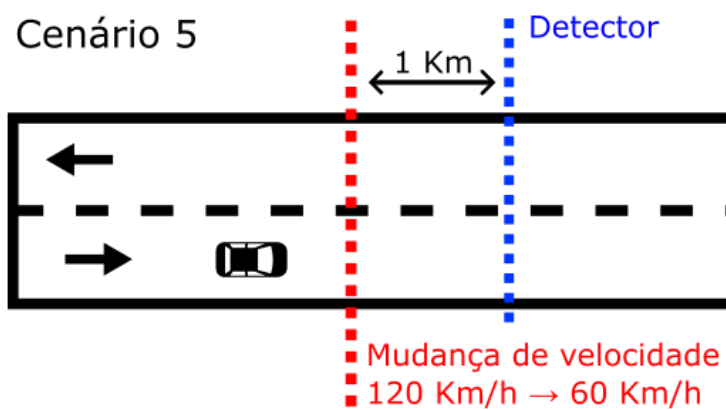


Fig. 21 – Esquema ilustrativo do cenário 5 de simulação.

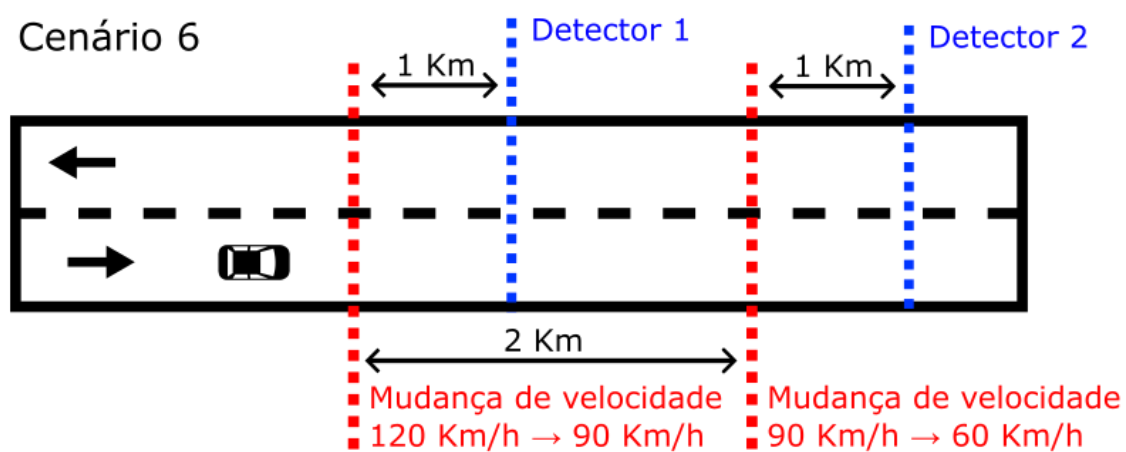


Fig. 22 – Esquema ilustrativo do cenário 6 de simulação.

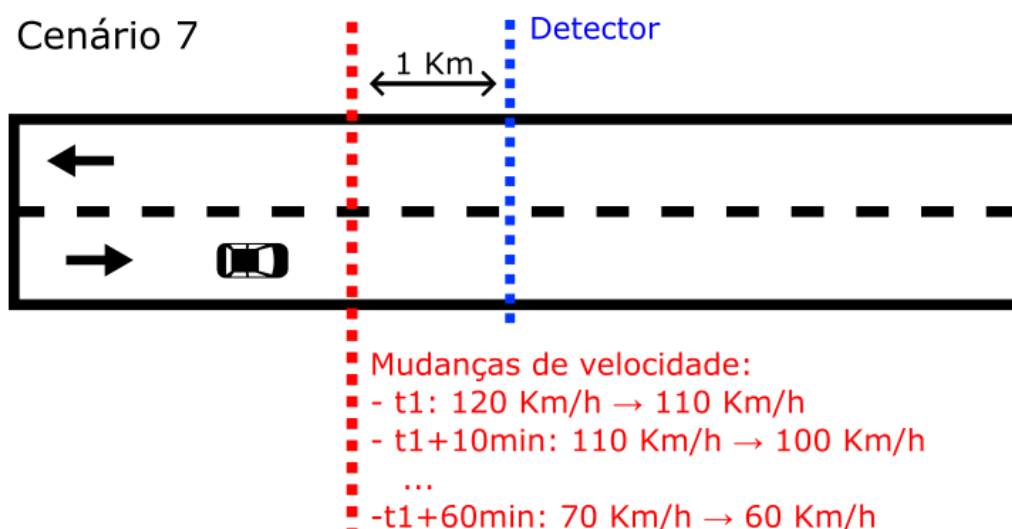


Fig. 23 – Esquema ilustrativo do cenário 7 de simulação.

Na tabela seguinte apresenta-se um resumo dos diferentes cenários.

Tabela 9 – Resumo dos cenários de simulação no programa VISSIM.

Cenário	Precipitação	Menor limite máximo	Tipo de aplicação
1	0 mm	120 Km/h	Não aplicado
2	2 mm	100 Km/h	Instantâneo
3	2 mm	100 Km/h	Gradual (espaço)
4	2 mm	100 Km/h	Gradual (tempo)
5	5 mm	60 Km/h	Instantâneo
6	5 mm	60 Km/h	Gradual (espaço)
7	5 mm	60 Km/h	Gradual (tempo)

O processo de escolha dos limites máximos é descrito no ponto seguinte desta dissertação (3.4.7).

3.4.7. AMPLITUDE DE VARIAÇÃO DOS LIMITES MÁXIMOS DE VELOCIDADE

O limite de velocidade máximo atualmente aplicado a este segmento de autoestrada é de 120 Km/h. A escolha dos limites máximos a serem utilizados na simulação foi feita com apoio do modelo de previsão de acidentes apresentado na secção 3.3 desta dissertação.

De acordo com o modelo, 1 mm de precipitação acumulada em uma hora causa um aumento de 11,2% para a probabilidade de ocorrência de acidente. Os cenários 2, 3 e 4 correspondem a um acréscimo de 2 mm de precipitação horária, situação que ocorre com frequência na área de estudo, e que corresponde a

um aumento do risco de acidentes em 25%. Os cenários 5, 6 e 7 correspondem a um acréscimo de 5 mm de precipitação, situação considerada como “chuva forte” pelo Instituto Português do Mar e da Atmosfera, e que corresponde a um aumento de 75% do risco de acidentes.

De forma a tentar anular os efeitos das condições climatéricas, as velocidades são determinadas utilizando o *Power Model* apresentado na secção 2.2.1, mais especificamente a equação (2). Para os cenários 2 e 3, o limite máximo é reduzido para 100 Km/h (9) e para os cenários 4 e 5, o limite máximo é reduzido para 60 Km/h (10).

$$A_2 = A_1 \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^2 \quad (2)$$

$$\frac{A_2}{A_1} = 0,75 \cap v_1 = 120 \text{ Km/h} \rightarrow v_2 \cong 100 \text{ Km/h} \quad (9)$$

$$\frac{A_2}{A_1} = 0,25 \cap v_1 = 120 \text{ Km/h} \rightarrow v_2 = 60 \text{ Km/h} \quad (10)$$

Especificamente nos cenários 3 e 6, em que o limite máximo de velocidade foi gradualmente reduzido no espaço em dois locais de sinalização, os limites máximos utilizados foram 110 Km/h e 90 Km/h para os primeiros locais de sinalização e 100 Km/h e 60 Km/h para os segundos locais de sinalização, respetivamente.

Nos cenários 4 e 7, em que o limite máximo de velocidade foi gradualmente reduzido no tempo em um só local de sinalização, o limite máximo de velocidade é reduzido à uma taxa de 10 Km/h a cada 10 minutos, até atingir-se os valores alvo de 100 Km/h e 60 Km/h, respetivamente. Também é retomada a velocidade anterior às reduções (120 Km/h) gradualmente, à mesma taxa de variação.

O limite máximo de 60 Km/h em autoestradas não é nem praticável nem recomendado, apenas utilizado neste estudo para fins de investigação face aos modelos de previsão de acidente disponíveis. De facto, reduções de velocidade de grande escala não são eficientes considerando-se que a relação entre a velocidade e a frequência de acidentes é usualmente descrita por funções quadráticas, como também é o *Power Model*, o que resulta em retornos cada vez menores para maiores reduções de velocidade.

Limites máximos demasiado baixos são problemáticos porque aumentam o tempo de viagem dos condutores. Num estudo em que um sistema VSL estava a ser aplicado para um problema de engarrafamento por tráfego intenso, Yu e Abdel-Aty (2014) testaram com sucesso a possibilidade de se elevar o limite máximo de velocidade para um valor mais elevado do que limite anterior à redução de velocidade, à jusante do problema de tráfego, como forma de compensar este efeito. Entretanto, esta solução foi testada para uma intervenção em que o sistema VSL funcionou em um troço de 2 milhas da estrada estudada, o que não é o caso deste estudo, que busca simular o efeito de condições climatéricas que devem se estender por áreas maiores do que o comprimento do sublanço estudado nesta dissertação.

3.4.8. TEMPORIZAÇÃO

Para todos os cenários a rede de tráfego foi simulada 10 vezes durante 7 horas (25200 segundos), sendo os dados da primeira e da última hora descartados para acomodar instabilidades no arranque e no término do modelo.

Em todos os cenários em que há mudanças de limites máximos de velocidade, estas mudanças começam a ser estabelecidas aos 7200 segundos de simulação, 1 hora depois do início da recolha de dados, e perduram pelo menos até os 14400 segundos de simulação (permanecendo ativas por pelo menos 2 horas).

Nos cenários em que os limites máximos de velocidade variam com o tempo, a taxa de variação é de 10 Km/h a cada 10 minutos.

No cenário 4, a mudança de velocidade de 120 para 100 Km/h ocorre durante 20 minutos, entre os 7200 e 8400 segundos de simulação. A mudança de volta para 120 Km/h ocorre entre os 14400 e os 15600 segundos.

No cenário 7, a mudança de 120 Km/h para 60 Km/h ocorre em 60 minutos, entre os 7200 e os 10800 segundos. A mudança de volta para 120 Km/h ocorre entre os 14400 e os 18000 segundos.

Para efeitos de comparação, as medições dos valores médios dos desvios padrão médios, das distâncias médias entre veículos (*space headways*) e dos tempos de viagem médios são feitas somente no período em que todos os sistemas VSL estão completamente estabelecidos, entre os 10800 e os 14400 segundos de simulação, totalizando 3600 segundos (1 hora) de medição.

Para auxiliar a compreensão e a visualização gráfica dos efeitos de aplicação do sistema VSL de diferentes formas, o tempo de simulação é dividido em intervalos de 300 segundos (5 minutos).

3.4.9. DADOS DE SAÍDA

Os dados extraídos para a criação de indicadores que representam os efeitos dos sistemas VSL sobre a segurança rodoviária são:

- As velocidades individuais dos veículos;
- Os tempos de entrada e de saída na área de medição do sensor.

Estes dados são inteiramente provenientes dos pontos de recolha instalados a 1 Km do ponto de mudança de limite de velocidade, e, portanto, correspondem a uma única secção por faixa de rodagem. Como referência para a “entrada” na área de medição, utiliza-se a frente (o pára-choques) do veículo.

Com estes dados pretende-se calcular os seguintes indicadores:

- Desvios padrão médios das velocidades na secção de medição;
- Desvios padrão médios das distâncias médias entre veículos que passam na secção de medição em sequência (*headways*)

As velocidades individuais são fornecidas de forma direta pelos detetores, e o desvio padrão corresponde à variabilidade de velocidade dos veículos que passam na secção do detetor.

Os *headways* são calculados ao multiplicar o intervalo de tempo entre a entrada de dois veículos consecutivos na área de medição pela diferença de velocidade entre eles.

Além destes indicadores, também serão extraídos os tempos de viagem médios dos veículos na rede, para controlar o desempenho da estrada face aos limites de velocidade mais baixos. Este indicador é diretamente fornecido pelo programa de simulação.

3.5. RESULTADOS

Neste capítulo são apresentadas figuras e tabelas que representam os resultados dos cenários estudados. Para uma melhor visualização dos resultados, os valores representados graficamente, que foram medidos com precisão de 1 segundo de simulação, foram agrupados em intervalos de tempo de 5 minutos, totalizando 60 intervalos.

Os resultados também estão agrupados por nível de risco, de forma que é possível uma comparação direta entre os cenários para as situações com precipitação de 2 mm e de 5 mm, em que os limites de velocidade são reduzidos para valores diferentes.

3.5.1. DESVIOS PADRÃO DA VELOCIDADE E DOS HEADWAYS – 2 MM DE PRECIPITAÇÃO

Nas figuras e tabelas seguintes apresentam-se os resultados obtidos, após o tratamento dos dados das diversas simulações realizadas, tendo presente o cenário base (cenário 1) e os cenários 2 a 4, inclusive.

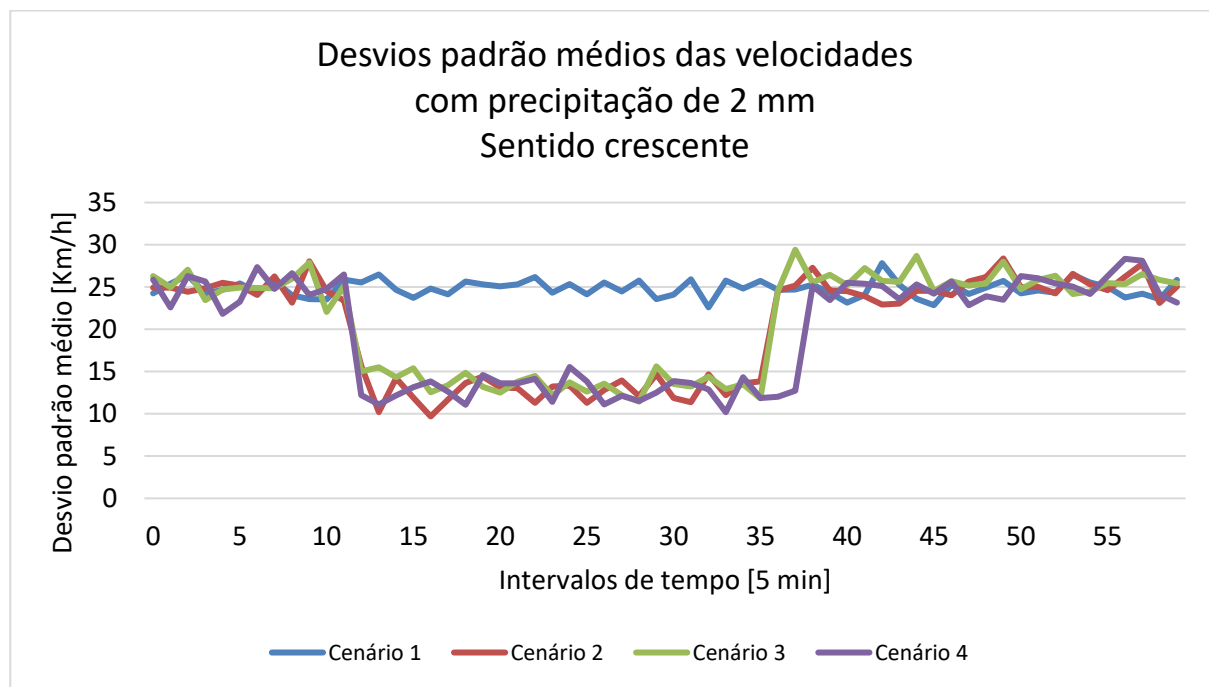


Fig. 24 – Resultado do desvio padrão médio das velocidades na secção de medição em sentido crescente com risco associado a 2 mm de precipitação.

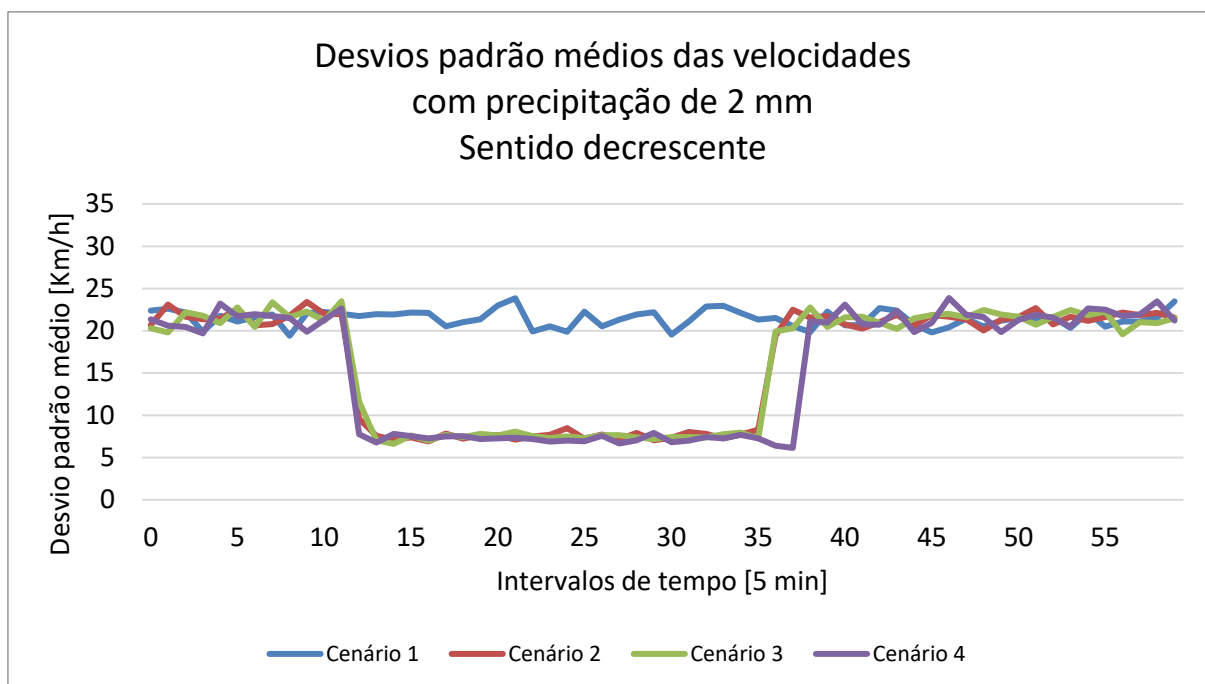


Fig. 25 – Resultado do desvio padrão médio das velocidades na secção de medição em sentido decrescente com risco associado a 2 mm de precipitação.

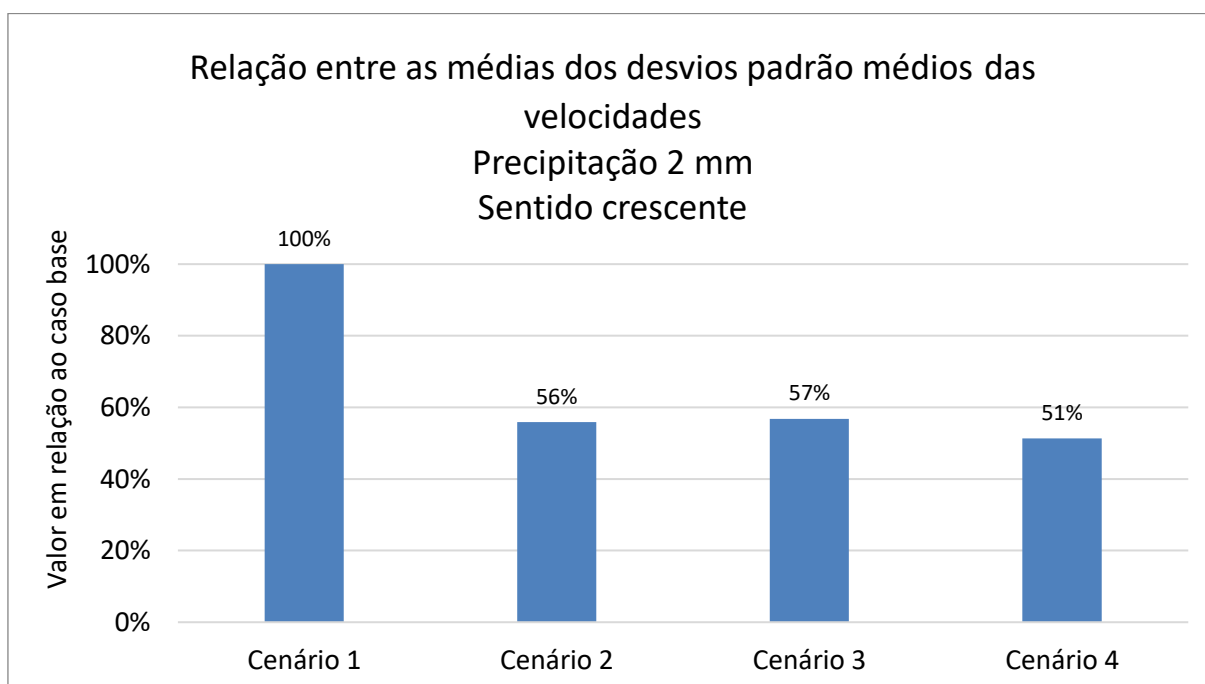


Fig. 26 – Relação entre as médias dos desvios padrão médios das velocidades na secção de medição em sentido crescente com risco associado a 2 mm precipitação.

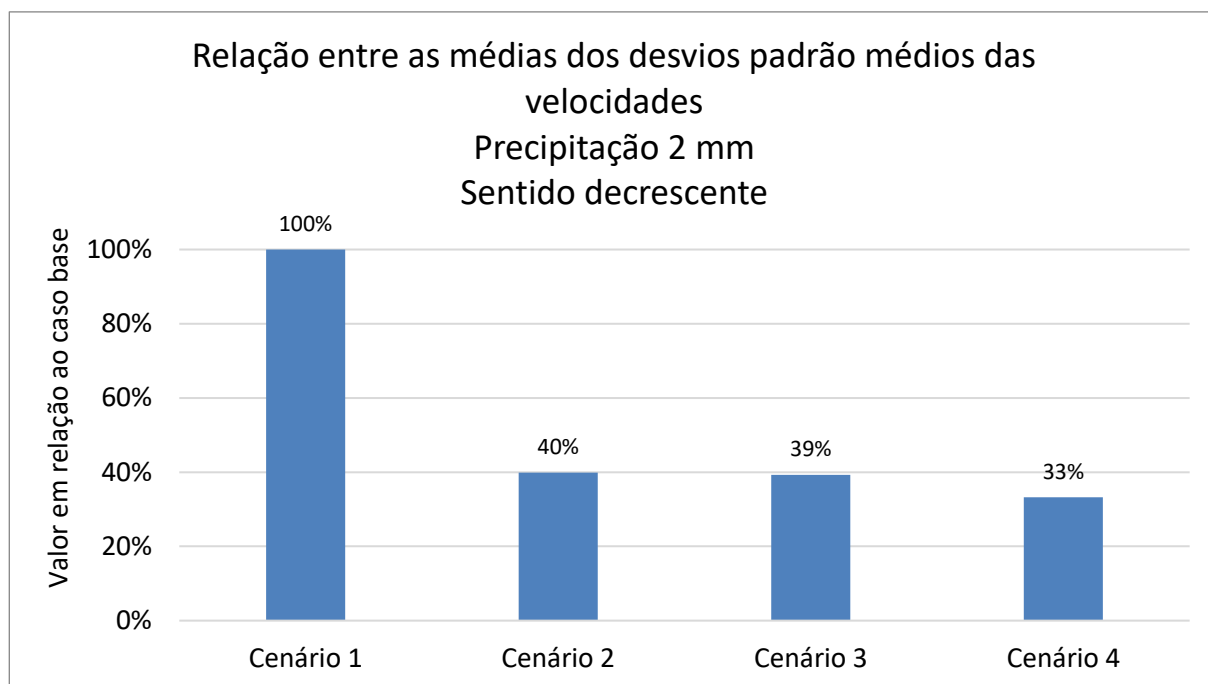


Fig. 27 – Relação entre as médias dos desvios padrão médios das velocidades na secção de medição em sentido decrescente com risco associado a 2 mm de precipitação.

Tabela 10 – Descrição das médias dos desvios padrão médios das velocidades em sentido crescente com risco associado a 2 mm de precipitação durante o período com sistema VSL activo.

Sentido crescente			
Cenário	Média dos desvios padrão médios	Percentual em relação ao cenário base	Tipo de aplicação
1	24,80 Km/h	100%	Não aplicado
2	13,87 Km/h	56%	Instantâneo
3	14,09 Km/h	67%	Gradual (espaço)
4	12,73 Km/h	51%	Gradual (tempo)

Tabela 11 – Descrição das médias dos desvios padrão médios das velocidades em sentido decrescente com risco associado a 2 mm de precipitação durante o período com sistema VSL activo.

Sentido decrescente			
Cenário	Média dos desvios padrão médios	Percentual em relação ao cenário base	Tipo de aplicação
1	21,49 Km/h	100%	Não aplicado
2	8,56 Km/h	40%	Instantâneo
3	8,44 Km/h	39%	Gradual (espaço)
4	7,14 Km/h	33%	Gradual (tempo)

Em todos os cenários com a aplicação do sistema VSL o desvio padrão médio da velocidade dos veículos que passaram na secção de medição foi reduzido substancialmente, e a diferença entre o cenário base e os demais foi semelhante em todos os casos.

Há uma diferença notável entre os percentuais relativos ao caso base quando se compara os sentidos de circulação. Observa-se no sentido crescente reduções entre 49% e 33% para os cenários com sistema VSL ativos, enquanto no sentido decrescente esta redução foi maior que 60% para os mesmos cenários.

A aplicação do sistema de forma gradual no tempo apresentou uma redução de desvio padrão consideravelmente maior que as das demais aplicações, em particular para o sentido decrescente, em que o desvio padrão atingiu 1/3 do caso base.

O efeito da aplicação do sistema VSL sobre os desvios é quase imediato, ocorrendo dentro do intervalo de tempo de 5 minutos.

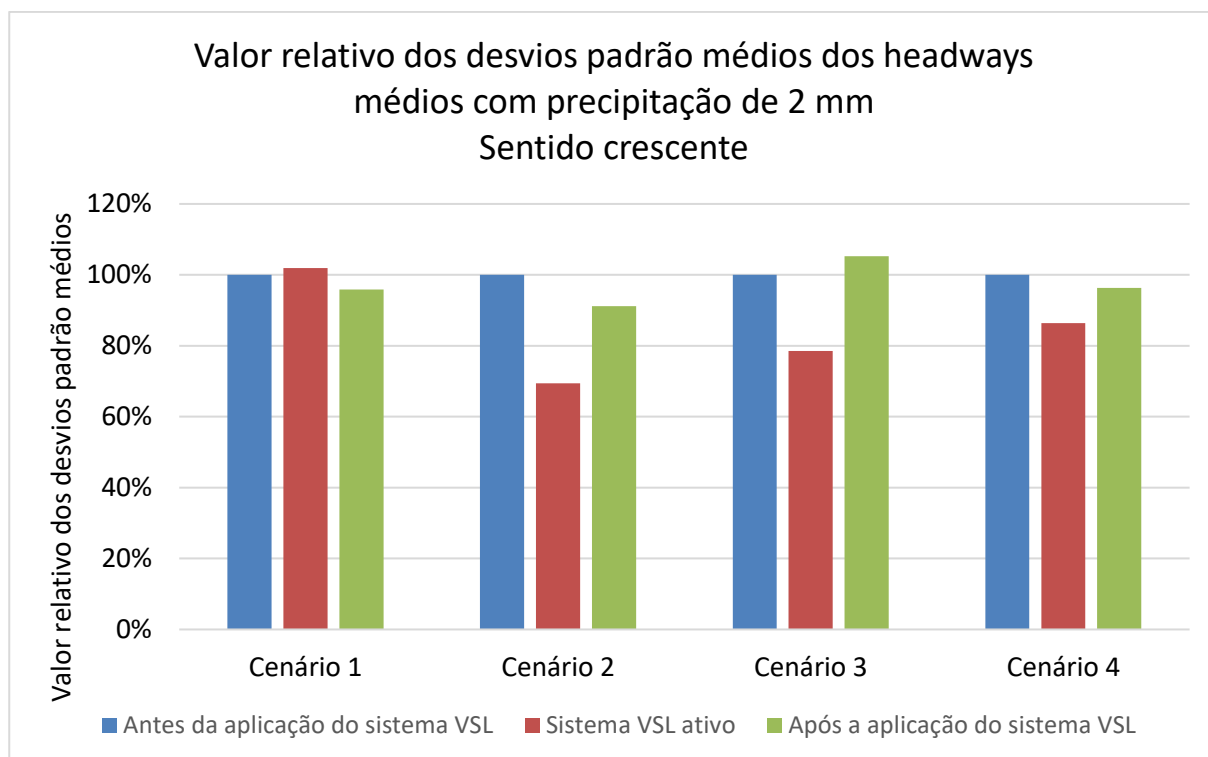


Fig. 28 – Resultado do desvio padrão médio do *headway* médio na secção de medição em sentido crescente com risco associado a 2 mm de precipitação.

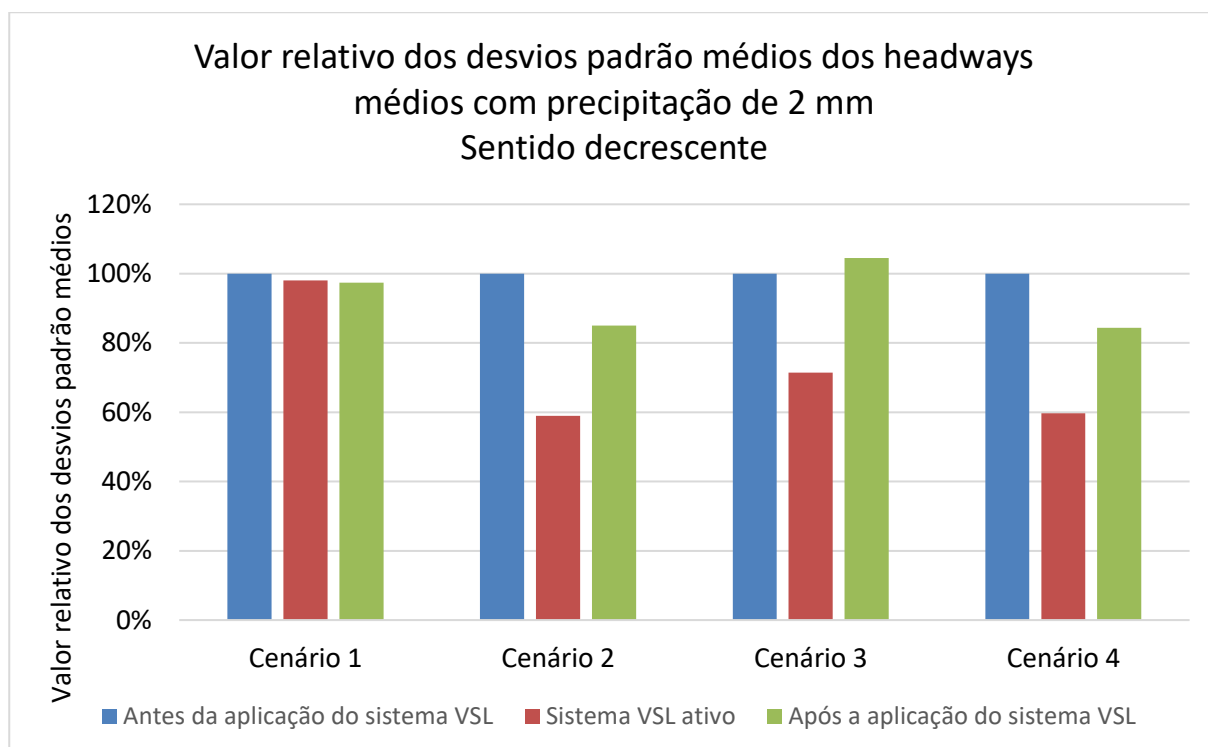


Fig. 29 – Resultado do desvio padrão médio do *headway* médio na secção de medição em sentido decrescente com risco associado a 2 mm de precipitação.

Tabela 12 – Descrição das médias dos *headways* médios em sentido crescente com risco associado a 2 mm de precipitação durante o período com sistema VSL ativo.

Sentido crescente			
Cenário	Média dos desvios padrão médios	Percentual em relação ao cenário base	Tipo de aplicação
1	25,73 m	100%	Não aplicado
2	19,59 m	76%	Instantâneo
3	20,38 m	79%	Gradual (espaço)
4	20,92 m	81%	Gradual (tempo)

Tabela 13 – Descrição das médias dos *headways* médios em sentido decrescente com risco associado a 2 mm de precipitação durante o período com sistema VSL ativo.

Sentido decrescente			
Cenário	Média dos desvios padrão médios	Percentual em relação ao cenário base	Tipo de aplicação
1	19,31 m	100%	Não aplicado
2	12,89 m	67%	Instantâneo
3	12,75 m	66%	Gradual (espaço)
4	13,39 m	69%	Gradual (tempo)

Observa-se reduções significativas da distância entre veículos para todos os cenários com sistema VSL ativo, variando entre 19% e 34% de redução.

Ao contrário do observado para os desvios padrão médios das velocidades, as reduções foram maiores no sentido decrescente em comparação com o sentido crescente. Entretanto, a diferença entre os sentidos foi de menor magnitude.

As reduções foram semelhantes entre os cenários para um mesmo sentido.

3.5.2. DESVIOS PADRÃO DA VELOCIDADE E *HEADWAYS* – 5 MM DE PRECIPITAÇÃO

Relativamente aos restantes cenários (5 a 7, inclusive), os resultados obtidos encontram-se apresentados nas figuras e tabelas seguintes, apresentando-se igualmente o cenário base (cenário 1).

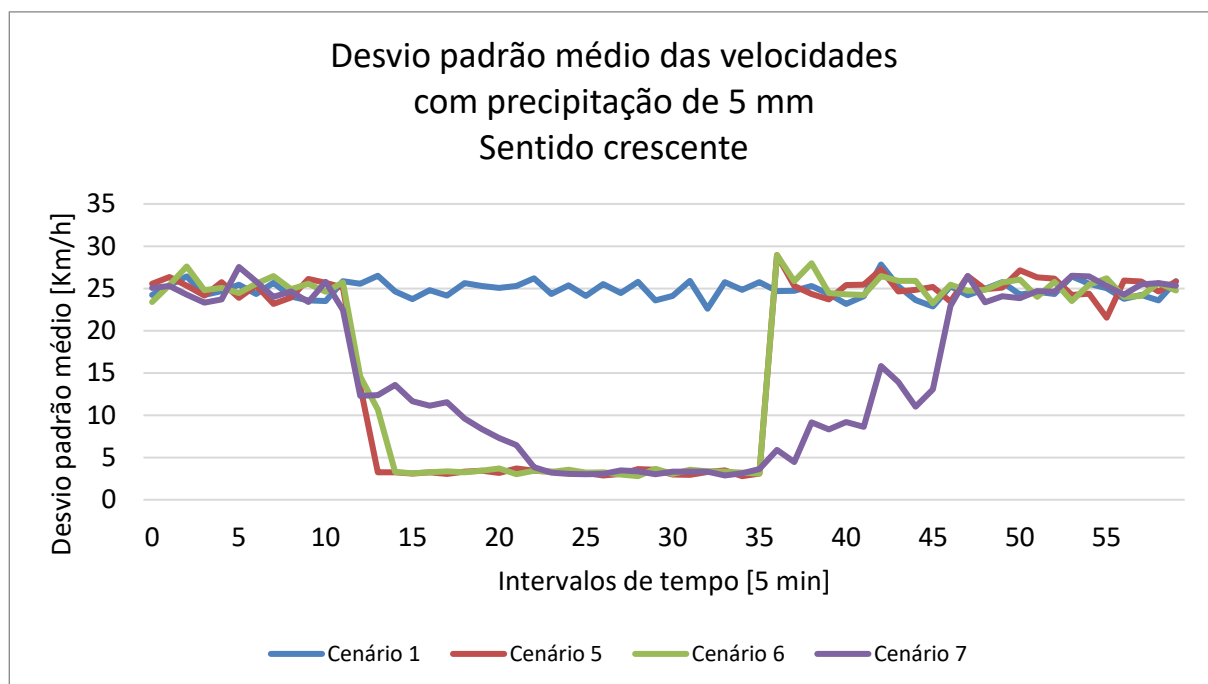


Fig. 30 – Resultado do desvio padrão médio das velocidades na secção de medição em sentido crescente com risco associado a 5 mm de precipitação.

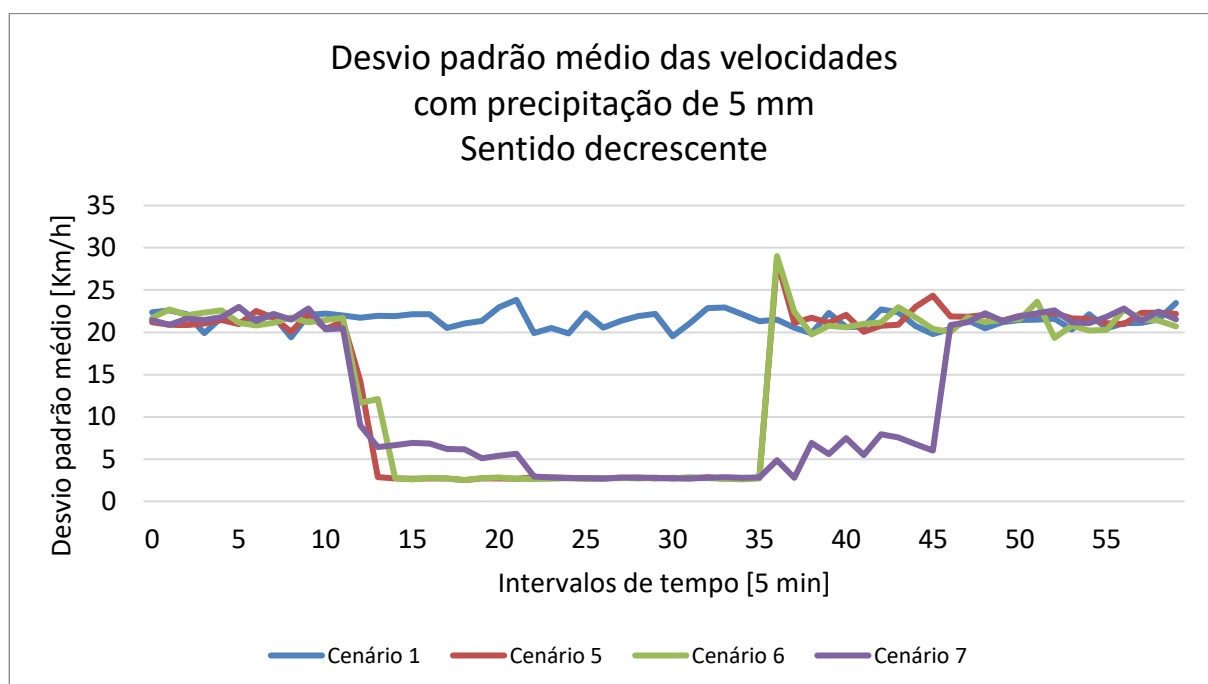


Fig. 31 – Resultado do desvio padrão médio das velocidades na secção de medição em sentido decrescente com risco associado a 5 mm de precipitação.

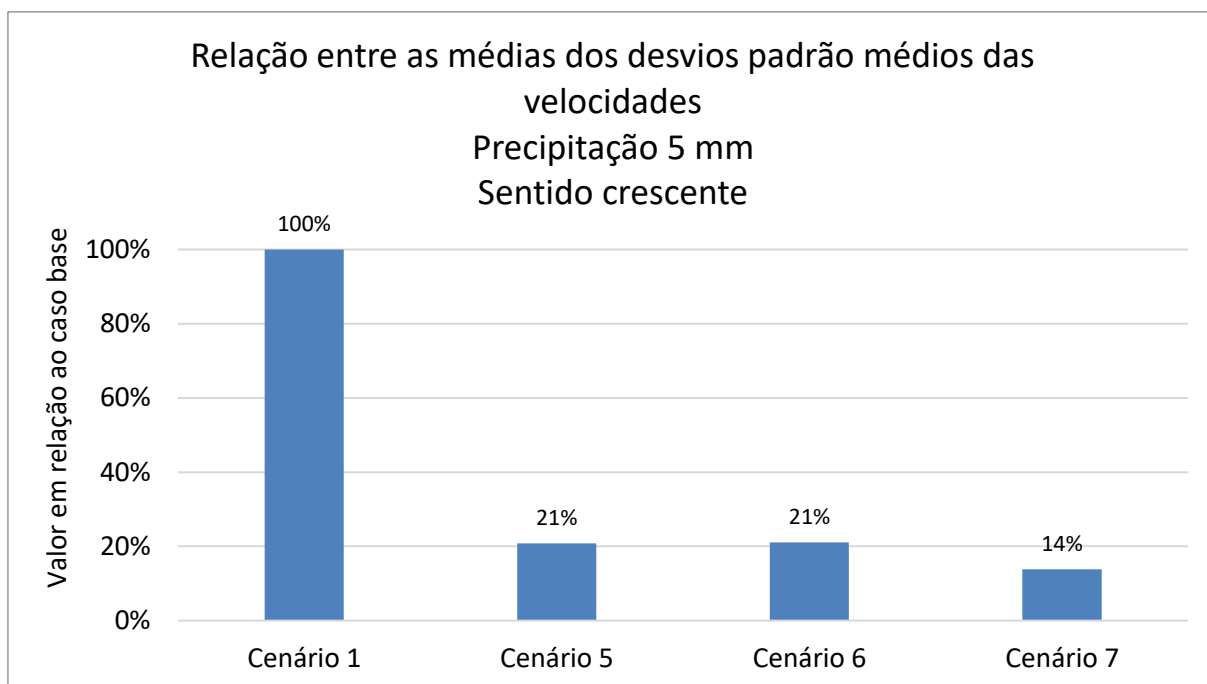


Fig. 32 – Relação entre as médias dos desvios padrão médios das velocidades na secção de medição em sentido crescente com risco associado a 5 mm precipitação.

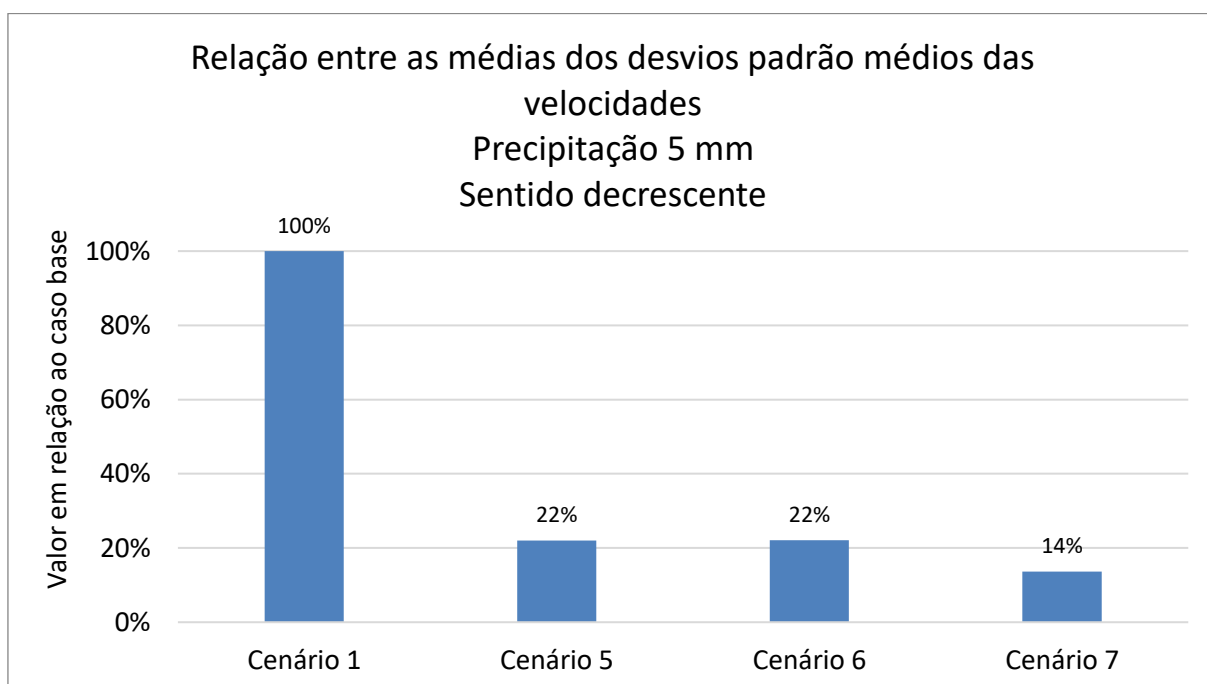


Fig. 33 – Relação entre as médias dos desvios padrão médios das velocidades na secção de medição em sentido decrescente com risco associado a 5 mm precipitação.

Tabela 14 – Descrição das médias dos desvios padrão médios das velocidades em sentido crescente com risco associado a 5 mm de precipitação durante o período com sistema VSL activo.

Sentido crescente			
Cenário	Média dos desvios padrão médios	Percentual em relação ao cenário base	Tipo de aplicação
1	24,80 Km/h	100%	Não aplicado
5	5,16 Km/h	21%	Instantâneo
6	5,22 Km/h	21%	Gradual (espaço)
7	3,42 Km/h	14%	Gradual (tempo)

Tabela 15 – Descrição das médias dos desvios padrão médios das velocidades em sentido decrescente com risco associado a 5 mm de precipitação durante o período com sistema VSL activo.

Sentido decrescente			
Cenário	Média dos desvios padrão médios	Percentual em relação ao cenário base	Tipo de aplicação
1	21,49 Km/h	100%	Não aplicado
5	4,73 Km/h	22%	Instantâneo
6	4,75 Km/h	22%	Gradual (espaço)
7	2,93 Km/h	14%	Gradual (tempo)

Semelhante ao ocorrido nas simulações com risco medido a 2 mm de precipitação, houve grandes reduções dos desvios padrão médios das velocidades em todos os cenários.

Para o sentido decrescente e com aplicação de sistema VSL gradual no tempo, a média dos desvios padrão médios foi apenas 14% da média do cenário base, um resultado muito expressivo.

Novamente nota-se uma tendência a resultados melhores para os cenários em sentido decrescente, embora a diferença entre os sentidos seja muito menor neste caso do que o que foi observado para 2 mm de precipitação.

As reduções de desvio padrão foram quase imediatas para os cenários 5 e 6. Para o cenário 7, a redução não ocorre uniformemente no tempo, mas é estabelecido um equilíbrio dos desvios no intervalo de 5 minutos após as últimas mudanças de limite máximo de velocidade.

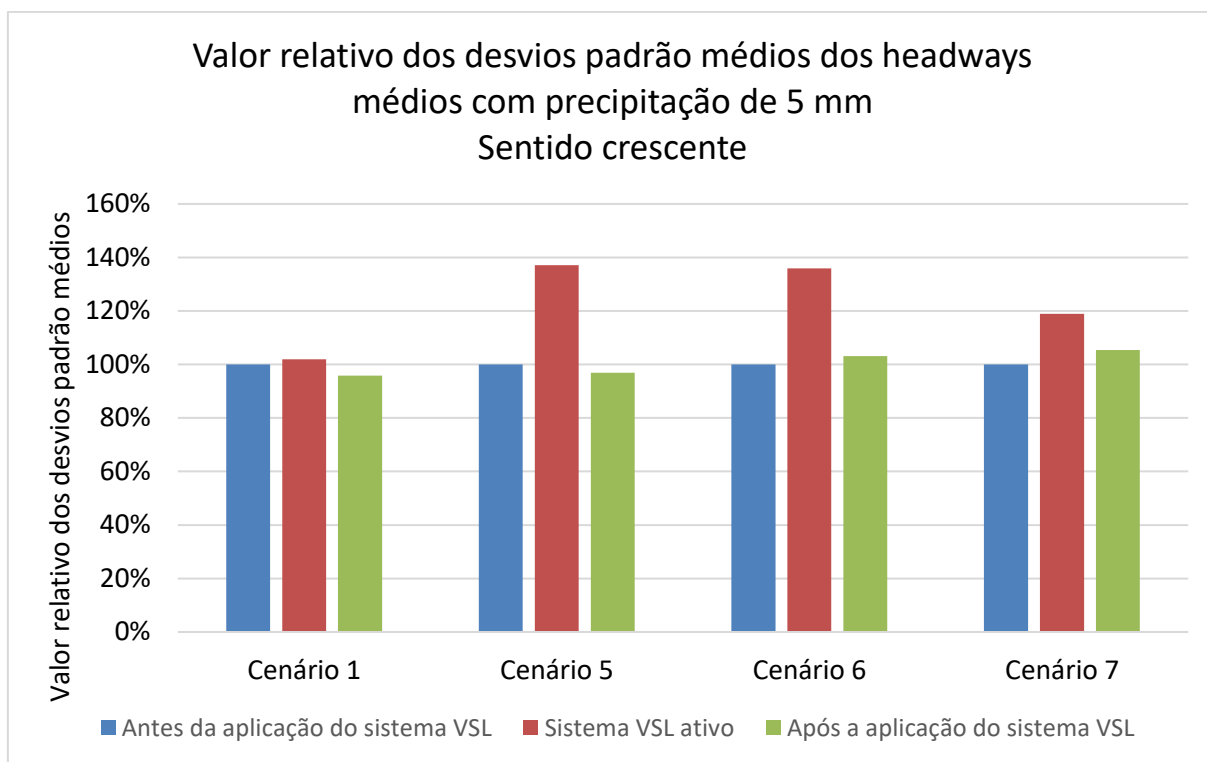


Fig. 34 – Resultado do desvio padrão médio do *headway* médio na secção de medição em sentido crescente com risco associado a 5 mm de precipitação.

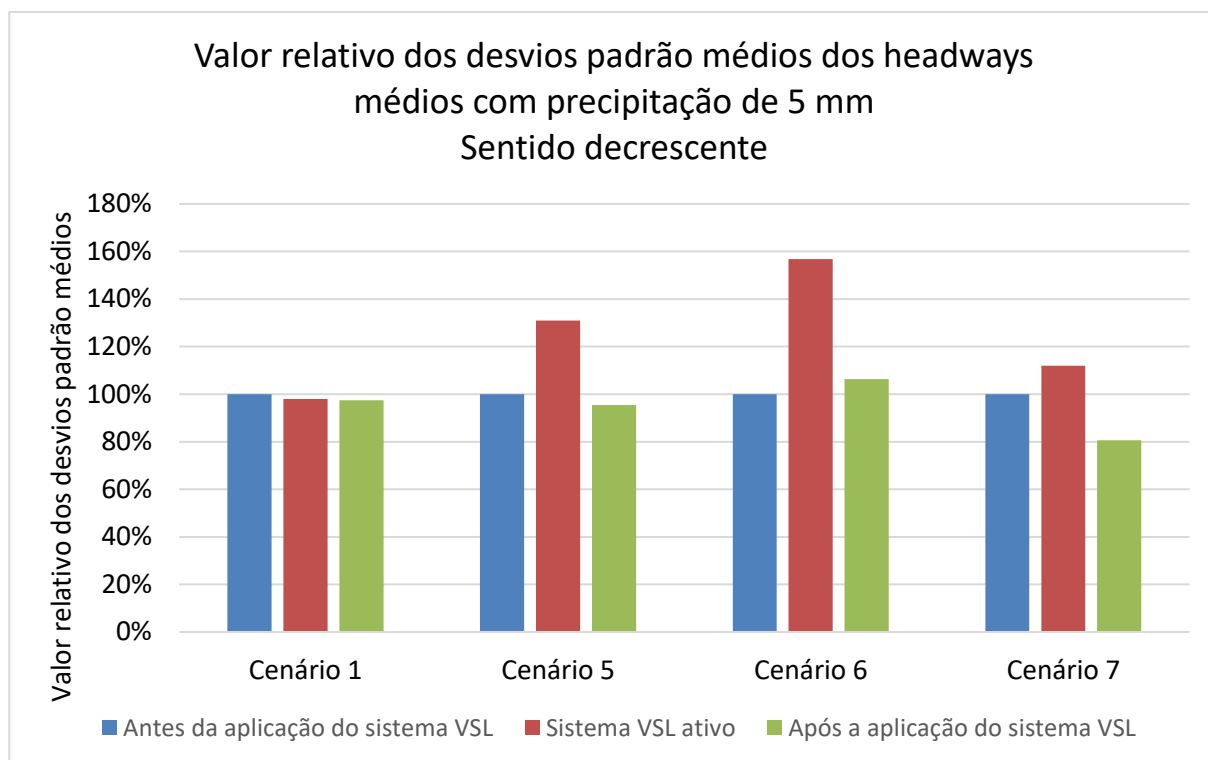


Fig. 35 – Resultado do desvio padrão médio do *headway* médio na secção de medição em sentido decrescente com risco associado a 5 mm de precipitação.

Tabela 16 – Descrição das médias dos headways médios em sentido crescente com risco associado a 5 mm de precipitação durante o período com sistema VSL activo.

Sentido crescente			
Cenário	Média dos devios padrão médios	Percentual em relação ao cenário base	Tipo de aplicação
1	25,73 m	100%	Não aplicado
5	34,63 m	135%	Instantâneo
6	35,98 m	140%	Gradual (espaço)
7	31,24 m	121%	Gradual (tempo)

Tabela 17 – Descrição das médias dos *headways* médios em sentido decrescente com risco associado a 5 mm de precipitação durante o período com sistema VSL ativo.

Sentido decrescente			
Cenário	Média dos desvios padrão médios	Percentual em relação ao cenário base	Tipo de aplicação
1	19,31 m	100%	Não aplicado
5	24,42 m	147%	Instantâneo
6	29,04 m	150%	Gradual (espaço)
7	25,50 m	132%	Gradual (tempo)

Na avaliação destes resultados, pode-se observar que a variabilidade dos *headways* foi muito maior nos cenários com precipitação de 5 mm, o que representa uma redução da segurança rodoviária para estes casos. Este resultado não era esperado, e não condiz com o que se observou para os cenários com 2 mm de precipitação.

Uma possível explicação é que a redução do limite de velocidade máximo de 120 Km/h para 60 Km/h é ampla demais para ser aplicada em uma autoestrada e pode ter criado zonas em que os veículos se aproximaram muito rapidamente, junto aos pontos de mudança de velocidade. De facto, as aplicações com mudanças de limite graduais no tempo (cenários 4 e 7) tiveram desempenhos melhores que as demais, embora ainda representem reduções de segurança rodoviária.

Em casos de extremo perigo, como o de volumes de precipitação acumulada superiores a 5 mm, pode ser necessário o desenvolvimento de um plano de aplicação mais detalhado e com mudanças de velocidade ainda mais graduais do que a taxa de 10 Km/h a cada 10 minutos utilizada nas simulações deste trabalho.

3.5.3. TEMPO DE VIAGEM

Relativamente à variável de controlo, tempo de viagem, apresenta-se nas figuras e tabela seguintes os resultados apurados relativamente a todos os cenários.

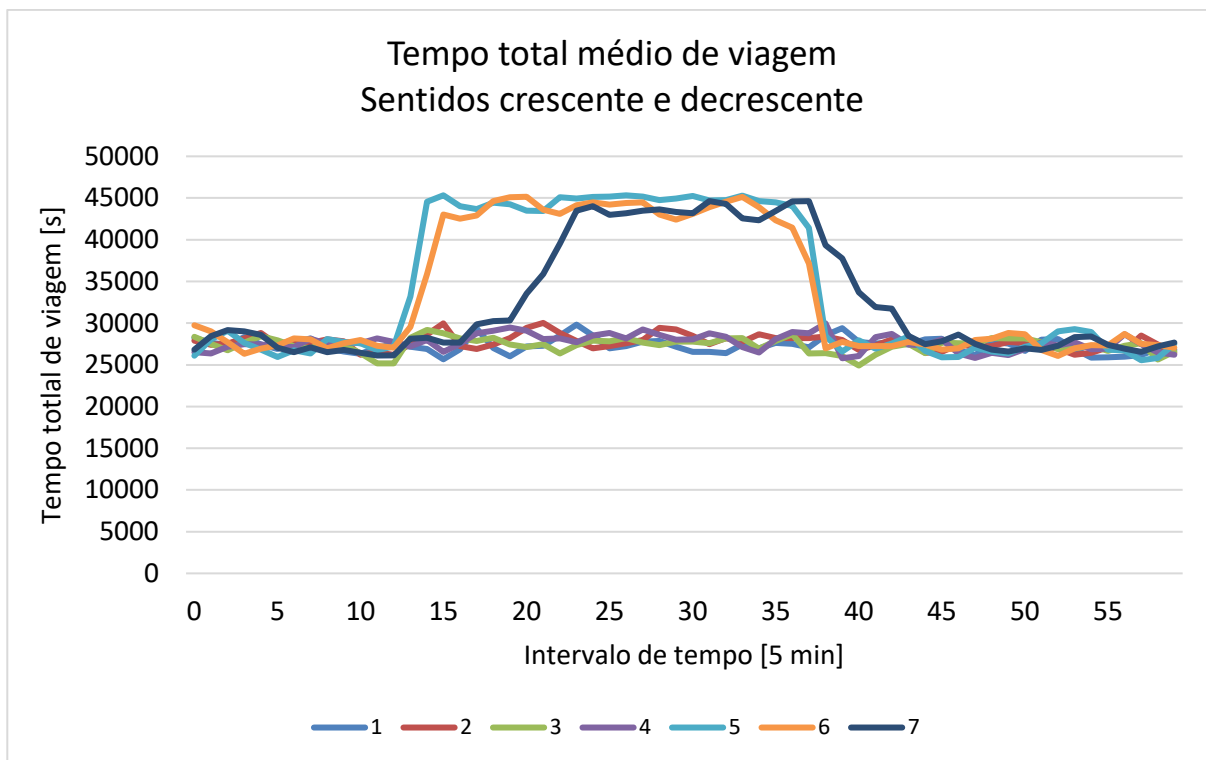


Fig. 36 – Resultado do tempo total médio de viagem de todos os veículos na rede.

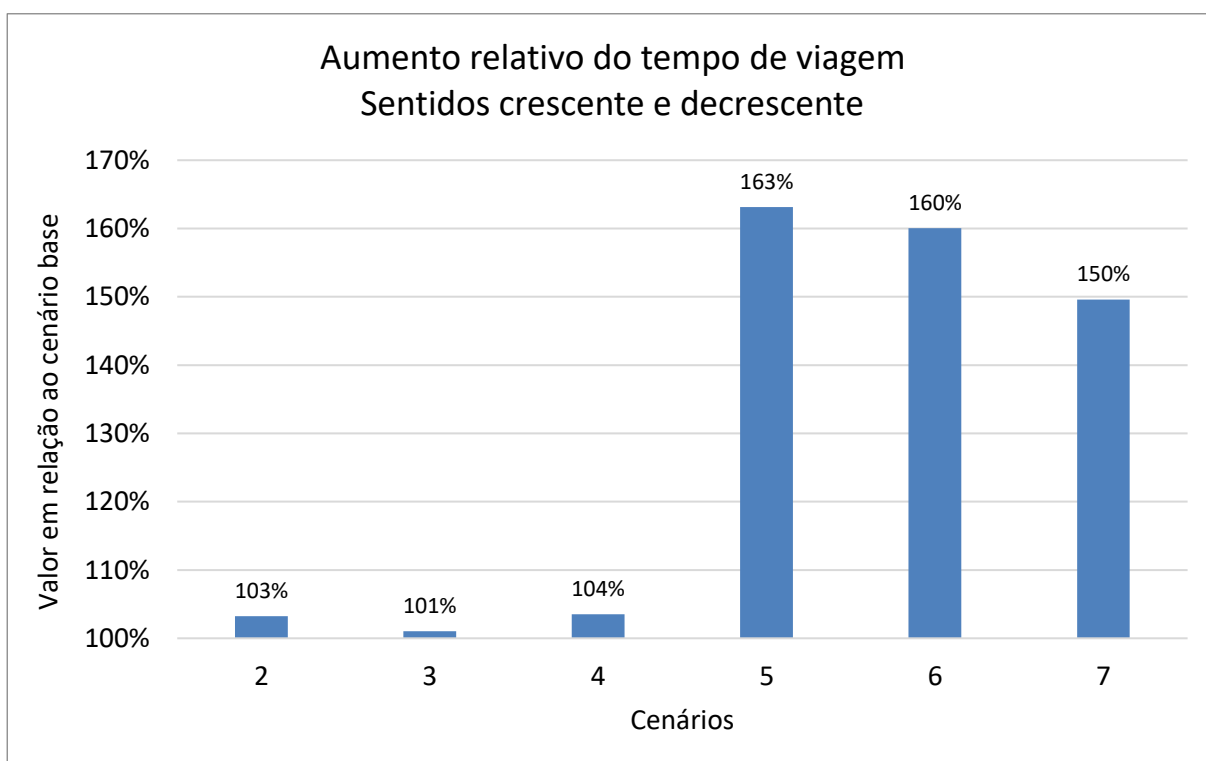


Fig. 37 – Aumento médio do tempo total médio de viagem dos veículos na rede com relação ao tempo médio de viagem do cenário base.

Tabela 18 – Descrição das médias dos tempos totais médios de viagem.

Cenário	Precipitação	Média dos tempos totais de viagem	Percentual em relação ao caso base	Tipo de aplicação
1	0 mm	27398 s	100%	Não aplicado
2	2 mm	28286 s	103%	Instantâneo
3	2 mm	27687 s	101%	Gradual (espaço)
4	2 mm	28360 s	104%	Gradual (tempo)
5	5 mm	44702 s	163%	Instantâneo
6	5 mm	43845 s	160%	Gradual (espaço)
7	5 mm	40981 s	150%	Gradual (tempo)

Como esperado, houve aumentos nos tempos de viagem. Os aumentos dos cenários 2, 3 e 4 foram, entretanto, surpreendentemente diminutos. Os limites máximos de velocidade nestes cenários foram reduzidos em 17% (120 para 100 Km/h), mas os tempos totais de viagem aumentaram somente até 4% no pior caso. Para estes cenários, pode-se considerar o aumento de tempo desprezável, portanto a aplicação do sistema VSL não afeta negativamente o condutor.

Nos cenários 5, 6 e 7, em que o limite máximo de velocidade foi reduzido à metade do valor estabelecido atualmente (de 120 Km/h para 60 Km/h), observam-se aumentos de tempo de viagem de até 63%, valor maior do que a redução.

O resultado do cenário 7 em particular é interessante. Ao analisar o período de simulação entre 7200 s (momento de mudança de limite de velocidade em todos os cenários) e 18000 s (última mudança de limite de velocidade no cenário 7), a média do limite máximo de velocidade é 80 Km/h, inferior à mesma média para os cenários 5 e 6, de 90 Km/h. Desta forma, era esperado que o cenário 7 apresentasse o pior desempenho para este indicador, e o que se observa é o contrário.

4

CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

4.1. CONCLUSÕES

Os sistemas de Gestão Inteligente de Tráfego têm como objetivo otimizar o fluxo de tráfego e melhorar a segurança rodoviária. Em particular a Gestão Dinâmica de Velocidades (GDV) é uma ferramenta que permite atuar sobre uma das variáveis que é a base de importantes indicadores de segurança: a velocidade.

Os sistemas de Limites Máximos de Velocidade Variáveis (sistemas VSL) são uma forma de execução da GDV com um custo relativamente baixo. Com estes sistemas é possível controlar a velocidade para reagir a condições de tráfego ou do ambiente da estrada que podem potencialmente aumentar o risco e a severidade de acidentes.

No capítulo 2 desta dissertação foram apresentados os pressupostos teóricos que explicam a importância do controlo da velocidade como fator preventivo de acidentes e a magnitude dos efeitos de condução sob condições climáticas adversas, bem como as formas como os sistemas VSL podem ser utilizados para mitigar estes riscos de segurança. A dispersão da velocidade foi identificada como indicador mais importante para a frequência dos acidentes, enquanto a velocidade instantânea serve melhor como indicador da severidade dos acidentes.

De modo a perceber como as variáveis climáticas afetam o risco de acidente a nível local em um sublanço de uma estrada no norte de Portugal, um modelo de previsão de acidentes baseado em dados de uma estação meteorológica perto da estrada foi criado.

Este modelo confirmou a hipótese de que a precipitação é um fenómeno de grande importância para a segurança rodoviária, e no caso específico da autoestrada em estudo, para cada 1 mm de precipitação acumulada em 1h o risco de acidente aumenta em 11,2%. Considerando que a região frequentemente recebe precipitação de forte intensidade, este fenómeno provavelmente é um dos maiores contribuidores para a geração de risco de acidentes a nível local.

Apesar de existirem outras soluções para aumentar a segurança perante condições climáticas, em especial a precipitação, os sistemas VSL são de implementação mais fácil e com baixo esforço de manutenção, além de ser potencialmente benéfico para o controlo do fluxo de tráfego quando há “estrangulamentos” que impedem o seu funcionamento adequado.

Para melhor compreender o impacto da adoção de um sistema VSL e a forma como este pode ser implementado, o sublanço em estudo foi então simulado com recurso ao modelo microscópico VISSIM, tendo-se desenvolvido diferentes cenários.

O resultado das simulações sugere que um sistema VSL pode ser uma ótima solução para o sublanço, visto que os indicadores de segurança observados apresentaram melhorias para quase todos os cenários de aplicação analisados.

Sobre o desvio padrão das velocidades dos veículos, que representa a dispersão da velocidade, podem ser esperadas reduções de mais de 80% com a aplicação do sistema VSL. Mesmo nos cenários em que as condições não foram as ideais para a eficiência do sistema, houve redução de pelo menos 40% do desvio padrão das velocidades.

Quando comparadas as faixas de rodagem de sentido crescente e decrescente do sublanço em estudo, considerando que para a simulação o volume de veículos foi diferente para cada sentido, parece que há um ganho de eficiência dos sistemas VSL quando este volume é maior, principalmente no que se refere à dispersão das velocidades.

Entre as formas de aplicação estudadas, a aplicação do sistema VSL com mudanças de limites máximos de velocidade distribuídas gradualmente no tempo obteve consistentemente os melhores resultados nas simulações realizadas. A forma de aplicação gradual no espaço frequentemente obteve resultados muito similares à aplicação instantânea das mudanças de limite máximo, pelo que não há incentivos para este tipo de aplicação.

Como a maior parcela do custo inicial de implementação destes sistemas está associado à aquisição de equipamentos como painéis eletrônicos de mensagens variáveis, o custo da aplicação gradual no espaço também seria significativamente mais alto do que as outras duas formas estudadas.

Já a diferença de custo entre as aplicações instantânea e gradual no tempo provavelmente estará no desenvolvimento do algoritmo de controlo dos limites máximos e no software de comunicação com os equipamentos em campo. Esta diferença não deve ser tão expressiva, e considerando-se os benefícios da aplicação gradual no tempo, esta provavelmente será recomendada na maior parte dos casos.

Uma parte importante para analisar a aplicabilidade destes sistemas na autoestrada estudada é perceber como a eficiência de tráfego é afetada quando são reduzidos os limites máximos de velocidade. Foi utilizada como variável de controlo para este efeito o tempo de viagem dos veículos ativos na rede de tráfego simulada.

Os cenários simulados em que a redução do limite máximo de velocidade foi de 17%, os tempos totais de viagem aumentaram em quantidades desprezáveis, o pior desempenho entre eles sendo um aumento de 4%. Nos outros cenários o aumento do tempo total de viagem foi superior à redução de 50% do limite máximo de velocidade, com exceção do cenário de aplicação gradual no tempo.

Este resultado significa que, na maior parte das situações, a perda de eficiência da corrente de tráfego afetada pelo sistema VSL não deve ser considerado como um entrave para a sua aplicação. A relação entre o limite de velocidade, a segurança rodoviária e o desempenho de circulação deve ser balanceada pela entidade operadora de acordo com as prioridades que o local exija.

Em resumo, as seguintes recomendações são resultantes deste trabalho:

- Utilizar sistemas VSL como solução para autoestradas com condições climatéricas adversas;
- Aplicar as mudanças de limite máximo de velocidade gradualmente com o tempo, com taxa de variação menor ou igual a 10 Km/h a cada 10 min;
- Utilizar medições locais de variáveis climatéricas e de tráfego para estabelecer critérios de mudança de limite máximo de velocidade.

4.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Embora os objetivos deste trabalho tenham sido alcançados, visto que os resultados das simulações realizadas indicam claramente melhoras dos indicadores de segurança quando a estrada esteve sujeita aos regimes de limite máximo de velocidade variáveis, a escala do estudo não permitiu uma visão

completa dos benefícios e dos problemas associados à utilização de limites máximos variáveis como solução para aumento de segurança rodoviária. Fenómenos de caráter estocástico como os acidentes e as condições climáticas são de imensa complexidade, e, portanto, os estudos que incidem sobre estes beneficiam-se complementos e de iterações sobre o conceito.

Até a data de conclusão desta dissertação, não existem muitos estudos que incidam sobre a relação entre a velocidade, as condições climáticas e a segurança rodoviária em conjunto. Este tipo de estudo exige uma base robusta de dados que incluam descrições de acidentes e das condições ambientais e de tráfego no momento da ocorrência e que representem uma quantidade de tempo grande o suficiente para garantir a significância dos resultados.

O modelo de previsão de acidentes criado e utilizado como base de estudo desta dissertação é simples na quantidade de variáveis independentes presentes para explicar o fenómeno em questão. Estudos futuros podem ser mais precisos se houver acesso a estes tipos de dados mencionados. É de se notar que o modelo não faz relação entre a velocidade e as variáveis climáticas, e para a escolha dos limites máximos utilizados na simulação microscópica de tráfego foi assumida uma relação direta entre estas variáveis, o que na realidade provavelmente não acontece.

Ainda sobre a previsão de acidentes, no modelo desenvolvido neste trabalho a velocidade do vento foi um previsor de grande impacto que não foi considerado para a simulação de aplicação do sistema VSL. Embora outros estudos sejam inconclusivos quanto a relação da velocidade do vento com a frequência e com a severidade dos acidentes, como discutido anteriormente, este resultado pode ser investigado em mais detalhes para o desenvolvimento de uma solução mais robusta.

O sucesso da implementação de um sistema VSL depende em grande parte da obediência dos condutores aos sinais de mudança de limite de velocidade, pelo que para a avaliação da aplicabilidade destes sistemas um estudo aprofundado sobre a resposta dos condutores inseridos na cultura do local de aplicação pode ser benéfico e recomenda-se que seja incluído em futuras análises. Em particular os testes com recurso a simuladores virtuais de condução podem ser uma via de pesquisa eficaz.

A literatura também carece de estudos sobre os efeitos de outras variáveis climáticas que não a chuva. Em destaque, a precipitação em forma de neve, que pode ser pior que as chuvas tanto em termos de frequência de acidente quanto para a severidade destes acidentes, merece maior atenção nos estudos deste tipo.

A maior desvantagem da utilização de sistemas VSL é a perda de eficiência da estrada quando o limite máximo de velocidade é reduzido. Em um estudo de 2006, Abdel-Aty, Dilmore e Dhindsa avaliaram que uma possível solução para este problema é aumentar o limite máximo para além do valor normal à jusante do problema de tráfego. O estudo incidiu sobre um sistema que atuava somente em um estreitamento do perfil transversal de curta extensão. Assim, futuros estudos sobre a aplicabilidade de sistemas VSL, como reação às más condições climáticas, podem ser dirigidos para a avaliação da eficácia deste tipo de solução em redes de tráfego maiores do que as estudadas nesta dissertação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdel-Aty, Mohamed, Jeremy Dillmore, e Albinder Dhindsa. 2006. "Evaluation of Variable Speed Limits for Real-Time Freeway Safety Improvement". *Accident Analysis & Prevention* 38, no.2: 335–45. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2005.10.010>.
- Abdel-Aty, Mohamed, Al-Ahad Ekram, Helai Huang, e Keechoo Choi. 2011. "A Study on Crashes Related to Visibility Obstruction Due to Fog and Smoke". *Accident Analysis & Prevention* 43, no.5: 1730–37. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2011.04.003>.
- Al-Ghamdi, Ali S. 2007. "Experimental Evaluation of Fog Warning System". *Accident Analysis & Prevention* 39, no.6: 1065–72. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2005.05.007>.
- Andrey, Jean, e Sam Yagar. 1993. "A Temporal Analysis of Rain-Related Crash Risk". *Accident Analysis & Prevention* 25, no.4: 465–72. [https://doi.org/10.1016/0001-4575\(93\)90076-9](https://doi.org/10.1016/0001-4575(93)90076-9).
- "Anuário Estatístico da Mobilidade e dos Transportes", Instituto da Mobilidade e dos Transportes. 2019. Acedido a 5 de junho de 2022. <https://www.imt-ip.pt/sites/IMTT/Portugues/Noticias/Paginas/Anuario-Estatistico-Mobilidade-Transportes-2019.aspx>.
- Baker, C. J., e S. Reynolds. 1992. "Wind-Induced Accidents of Road Vehicles". *Accident Analysis & Prevention* 24, no.6: 559–75. [https://doi.org/10.1016/0001-4575\(92\)90009-8](https://doi.org/10.1016/0001-4575(92)90009-8).
- Brijs, Tom, Dimitris Karlis, e Geert Wets. 2008. "Studying the Effect of Weather Conditions on Daily Crash Counts Using a Discrete Time-Series Model". *Accident Analysis & Prevention* 40, no.3: 1180–90. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2008.01.001>.
- Caliendo, Ciro, Maurizio Guida, e Alessandra Parisi. 2007. "A Crash-Prediction Model for Multilane Roads". *Accident Analysis & Prevention* 39, no.4: 657–70. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2006.10.012>.
- "Capital costs to install temporary Variable Speed Limit (VSL) systems in Texas ranged from \$91K to \$180K". 2017. Intelligent Transportation Systems Joint Program Office. Acedido a 24 de julho de 2022. <https://www.itskrs.its.dot.gov/its/benecost.nsf/ID/cb9ccd9b6ce62a7e85257f9a0067e992>.
- "Dados de base do SNIRH". 2022. Portal do SNIRH. 7 de julho de 2022. Acedido a 7 de julho de 2022. <https://snirh.apambiente.pt/index.php?idMain=2&idItem=1&objCover=920123704&objSite=920685744>.
- Elvik, Rune. 2013. "A before–after Study of the Effects on Safety of Environmental Speed Limits in the City of Oslo, Norway". *Safety Science* 55, junho: 10–16. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2012.12.007>.
- Elvik, Rune, Peter Christensen, e Astrid Helene Amundsen. 2004. *Speed and road accidents: an evaluation of the power model*. TØI, Transportøkonomisk Institutt, Oslo - Norge: Transportøkonomisk Institutt.
- "EU road safety policy framework". 2020. Luxembourg Publications Office of the European Union. <https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/legislation/swd20190283-roadsafety-vision-zero.pdf>.
- Fildes, Brian, G. Rumbold, e A. Leening. 1991. "Speed Behaviour and Drivers' Attitudes to Speeding", janeiro.
- Fridstrøm, Lasse, Jan Ifver, Siv Ingebrigtsen, Risto Kulmala, e Lars Krogsgård Thomsen. 1995. "Measuring the Contribution of Randomness, Exposure, Weather, and Daylight to the Variation

- in Road Accident Counts". *Accident Analysis & Prevention* 27, no.1: 1–20. [https://doi.org/10.1016/0001-4575\(94\)E0023-E](https://doi.org/10.1016/0001-4575(94)E0023-E).
- Hegyi, A. 2004. "Model Predictive Control for Integrating Traffic Control Measures". Delft: The Netherlands Trail Research School.
- Keay, Kevin, e Ian Simmonds. 2006. "Road Accidents and Rainfall in a Large Australian City". *Accident Analysis & Prevention* 38, no.3: 445–54. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2005.06.025>.
- Kloeden, C.N., G. Ponte, e A.J. McLean. 2001. "Travelling Speed and the Risk of Crash Involvement on Rural Roads", julho, 46.
- Lee, Chris, e Mohamed Abdel-Aty. 2008. "Testing Effects of Warning Messages and Variable Speed Limits on Driver Behavior Using Driving Simulator". *Transportation Research Record* 2069, no.1: 55–64. <https://doi.org/10.3141/2069-08>.
- Nes, Nicole van, Stefan Brandenburg, e Divera Twisk. 2008a. "Dynamic speed limits; effects on homogeneity of driving speed". Comunicação apresentada em 2008 *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, 269–74. <https://doi.org/10.1109/IVS.2008.4621229>.
- . 2008b. "Dynamic speed limits; effects on homogeneity of driving speed". Comunicação apresentada em 2008 *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, 269–74. <https://doi.org/10.1109/IVS.2008.4621229>.
- Nilsson, G. 2004. "Traffic Safety Dimensions and the Power Model to Describe the Effect of Speed on Safety". *BULLETIN*, n.º 221. <https://trid.trb.org/view/749149>.
- Nilsson, Göran. 1982. "The Effects of Speed Limits on Traffic Accidents in Sweden". *VTI Särtryck* 68. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:671036/FULLTEXT01.pdf>.
- Pande, Anurag, e Brian Wolshon. 2016. *Traffic Engineering Handbook*. 7th ed. Wiley & Sons.
- Quddus, Mohammed. 2013. "Exploring the Relationship Between Average Speed, Speed Variation, and Accident Rates Using Spatial Statistical Models and GIS". *Journal of Transportation Safety & Security* 5, no.1: 27–45. <https://doi.org/10.1080/19439962.2012.705232>.
- Rämä, Pirkko. 1999. "Effects of Weather-Controlled Variable Speed Limits and Warning Signs on Driver Behavior". *Transportation Research Record* 1689, no.1: 53–59. <https://doi.org/10.3141/1689-08>.
- "Relatório Anual de Segurança Rodoviária", Autoridade Nacional de Segurança Rodoviária. 2019.
- "Relatório Anual de Sinistralidade", Autoridade Nacional de Segurança Rodoviária. 2021.
- "Road safety", World Health Organization, 2022. Acedido a 5 de junho de 2022. <https://www.who.int/health-topics/road-safety>.
- Ronan. 2018. "Speed and Crash Risk". Text. ITF. 29 de março de 2018. Acedido a 1 de abril de 2022. <https://www.itf-oecd.org/speed-crash-risk>.
- Sherretz, Lynn A., e Barbara C. Farhar. 1978. "An Analysis of the Relationship Between Rainfall and the Occurrence Of Traffic Accidents". *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 17, no.5: 711–15. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1978\)017<0711:AAOTRB>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1978)017<0711:AAOTRB>2.0.CO;2).
- Solomon, David Harris. 1964. *Accidents on Main Rural Highways Related to Speed, Driver, and Vehicle*. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration.
- Strömgren, Per, e Gunnar Lind. 2016. "Harmonization with Variable Speed Limits on Motorways". *Transportation Research Procedia*, International Symposium on Enhancing Highway Performance (ISEHP), June 14-16, 2016, Berlin, 15, janeiro: 664–75. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.06.056>.

- Theofilatos, Athanasios, Daniel Graham, e George Yannis. 2012. "Factors Affecting Accident Severity Inside and Outside Urban Areas in Greece". *Traffic Injury Prevention* 13, no.5: 458–67. <https://doi.org/10.1080/15389588.2012.661110>.
- Theofilatos, Athanasios, e George Yannis. 2014. "A Review of the Effect of Traffic and Weather Characteristics on Road Safety". *Accident Analysis & Prevention* 72, novembro: 244–56. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2014.06.017>.
- Yannis, George, e Matthew G. Karlaftis. 2010. "Weather Effects on Daily Traffic Accidents and Fatalities: A Time Series Count Data Approach". *Proceedings of the 89th Annual Meeting of the Transportation Research Board*. 10, janeiro: 14.
- Yu, Rongjie, e Mohamed Abdel-Aty. 2014. "An Optimal Variable Speed Limits System to Ameliorate Traffic Safety Risk". *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 46, setembro: 235–46. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2014.05.016>.

ANEXOS

ANEXO I

DISTRIBUIÇÃO DAS VELOCIDADES MEDIDAS POR RADAR NA AUTOESTRADA A7 PK 96

Distribuição das velocidades Sentido crescente		
Velocidade (Km/h)	Cumulativo (%)	Individual (%)
5	0.04	0.04
8	0.06	0.02
30	0.08	0.02
32	0.10	0.02
34	0.12	0.02
41	0.14	0.02
43	0.16	0.02
45	0.22	0.06
46	0.26	0.04
47	0.30	0.04
48	0.31	0.02
49	0.37	0.06
50	0.45	0.08
51	0.57	0.12
52	0.63	0.06
53	0.73	0.10
54	0.89	0.16
55	1.04	0.16

Distribuição das velocidades Sentido decrescente		
Velocidade (Km/h)	Cumulativo (%)	Individual (%)
4	0.02	0.02
5	0.04	0.02
6	0.06	0.02
9	0.09	0.04
11	0.15	0.06
12	0.19	0.04
13	0.26	0.07
14	0.32	0.06
15	0.35	0.04
16	0.39	0.04
17	0.45	0.06
18	0.46	0.02
19	0.48	0.02
20	0.52	0.04
21	0.54	0.02
22	0.58	0.04
23	0.63	0.06
24	0.65	0.02

56	1.30	0.26		27	0.72	0.07
57	1.50	0.20		28	0.74	0.02
58	1.91	0.41		38	0.76	0.02
59	2.18	0.28		63	0.78	0.02
60	2.74	0.55		64	0.80	0.02
61	3.21	0.47		68	0.82	0.02
62	3.68	0.47		69	0.85	0.04
63	4.19	0.51		70	0.87	0.02
64	4.98	0.79		71	0.91	0.04
65	5.43	0.45		72	0.93	0.02
66	5.98	0.55		73	0.95	0.02
67	6.40	0.41		74	1.00	0.06
68	7.06	0.67		75	1.08	0.07
69	7.54	0.47		76	1.11	0.04
70	8.01	0.47		77	1.19	0.07
71	8.70	0.69		78	1.26	0.07
72	9.56	0.87		79	1.47	0.20
73	10.17	0.61		80	1.60	0.13
74	11.12	0.94		81	1.67	0.07
75	11.63	0.51		82	1.78	0.11
76	12.36	0.73		83	1.99	0.20
77	13.24	0.89		84	2.12	0.13
78	14.03	0.79		85	2.43	0.32
79	14.84	0.81		86	2.64	0.20
80	15.53	0.69		87	3.20	0.56
81	16.39	0.87		88	3.81	0.61
82	17.30	0.91		89	4.33	0.52
83	18.38	1.08		90	4.98	0.65

84	19.89	1.52		91	5.95	0.97
85	21.33	1.44		92	7.43	1.49
86	23.32	1.99		93	8.92	1.49
87	25.27	1.95		94	10.74	1.82
88	27.33	2.07		95	12.89	2.16
89	29.36	2.03		96	15.42	2.53
90	30.48	1.12		97	17.04	1.62
91	31.72	1.24		98	19.18	2.14
92	32.74	1.02		99	20.40	1.23
93	34.08	1.34		100	21.50	1.10
94	35.32	1.24		101	22.71	1.21
95	36.72	1.40		102	23.49	0.78
96	37.98	1.26		103	24.25	0.76
97	39.06	1.08		104	25.07	0.82
98	40.48	1.42		105	25.60	0.54
99	41.97	1.50		106	26.37	0.76
100	43.23	1.26		107	27.16	0.80
101	44.84	1.61		108	27.98	0.82
102	46.18	1.34		109	28.84	0.85
103	47.91	1.73		110	29.80	0.97
104	49.57	1.65		111	30.96	1.15
105	51.24	1.67		112	32.00	1.04
106	52.97	1.73		113	32.87	0.87
107	54.58	1.61		114	33.85	0.98
108	56.43	1.85		115	34.91	1.06
109	58.48	2.05		116	36.27	1.36
110	60.19	1.71		117	37.48	1.21

111	62.18	1.99		118	38.65	1.17
112	64.54	2.36		119	40.30	1.65
113	66.33	1.79		120	42.14	1.84
114	68.24	1.91		121	43.98	1.84
115	70.17	1.93		122	45.67	1.69
116	72.16	1.99		123	47.58	1.91
117	73.93	1.77		124	49.54	1.95
118	75.90	1.97		125	51.71	2.17
119	77.45	1.55		126	54.07	2.36
120	78.96	1.52		127	56.45	2.38
121	80.46	1.50		128	58.44	1.99
122	81.68	1.22		129	60.46	2.03
123	83.14	1.46		130	62.15	1.69
124	84.30	1.16		131	63.94	1.78
125	85.50	1.20		132	65.77	1.84
126	86.80	1.30		133	67.58	1.80
127	88.00	1.20		134	69.42	1.84
128	89.22	1.22		135	71.24	1.82
129	90.18	0.96		136	72.87	1.64
130	91.26	1.08		137	74.10	1.23
131	92.05	0.79		138	75.60	1.51
132	92.88	0.83		139	77.11	1.51
133	93.49	0.61		140	78.67	1.56
134	94.20	0.71		141	80.12	1.45
135	94.86	0.67		142	81.44	1.32
136	95.32	0.45		143	82.66	1.23
137	95.85	0.53		144	83.74	1.08
138	96.30	0.45		145	84.54	0.80

139	96.65	0.35		146	85.73	1.19
140	97.11	0.45		147	86.68	0.95
141	97.38	0.28		148	87.68	1.00
142	97.64	0.26		149	88.74	1.06
143	98.03	0.39		150	89.61	0.87
144	98.27	0.24		151	90.38	0.76
145	98.43	0.16		152	91.12	0.74
146	98.60	0.18		153	91.79	0.67
147	98.76	0.16		154	92.36	0.58
148	98.96	0.20		155	93.01	0.65
149	99.11	0.16		156	93.46	0.45
151	99.21	0.10		157	93.87	0.41
152	99.29	0.08		158	94.35	0.48
153	99.45	0.16		159	94.89	0.54
154	99.53	0.08		160	95.30	0.41
155	99.59	0.06		161	95.76	0.46
157	99.69	0.10		162	96.12	0.35
158	99.72	0.04		163	96.53	0.41
160	99.74	0.02		164	96.79	0.26
161	99.76	0.02		165	97.05	0.26
163	99.78	0.02		166	97.27	0.22
164	99.86	0.08		167	97.42	0.15
165	99.88	0.02		168	97.64	0.22
167	99.90	0.02		169	97.90	0.26
171	99.94	0.04		170	98.12	0.22
172	99.96	0.02		171	98.23	0.11
175	99.98	0.02		172	98.38	0.15

188	100.00	0.02		173	98.57	0.19
-	-	-		174	98.72	0.15
-	-	-		175	98.79	0.07
-	-	-		176	98.92	0.13
-	-	-		177	98.96	0.04
-	-	-		178	99.11	0.15
-	-	-		179	99.18	0.07
-	-	-		180	99.28	0.09
-	-	-		181	99.33	0.06
-	-	-		182	99.41	0.07
-	-	-		183	99.44	0.04
-	-	-		184	99.50	0.06
-	-	-		185	99.55	0.06
-	-	-		186	99.65	0.09
-	-	-		187	99.72	0.07
-	-	-		188	99.74	0.02
-	-	-		189	99.78	0.04
-	-	-		190	99.81	0.04
-	-	-		191	99.83	0.02
-	-	-		192	99.85	0.02
-	-	-		194	99.87	0.02
-	-	-		196	99.89	0.02
-	-	-		199	99.93	0.04
-	-	-		201	99.94	0.02
-	-	-		204	99.98	0.04
-	-	-		205	100.00	0.02

ANEXO II

DADOS DE SAÍDA DA SIMULAÇÃO FEITA COM O PTV VISSIM 2020

DESVIOS PADRÃO MÉDIOS DA VELOCIDADE MÉDIA (KM/H) EM INTERVALOS DE 5 MINUTOS

SENTIDO CRESCENTE

Tempo (s)	Num. do Intervalo	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5	Cenário 6	Cenário 7
3600	0	24.24459547	24.91933027	26.29633855	25.8799859	25.56819296	23.41162915	25.07861494
3900	1	25.3800206	24.92882558	24.96086548	22.60099638	26.36421172	25.39536783	25.30741326
4200	2	26.41210399	24.44517952	27.06341636	26.28294285	25.33648424	27.60438979	24.25373835
4500	3	24.2317915	24.85780893	23.4445428	25.66408458	24.16265653	24.80674846	23.30971845
4800	4	24.68082598	25.50175702	24.7229554	21.83380324	25.74343425	25.04619575	23.6866626
5100	5	25.42667646	25.17738739	24.92895003	23.27197567	23.88607668	24.44938589	27.53927124
5400	6	24.35807337	24.06453843	24.89342476	27.35479895	25.34720438	25.5443557	25.82413474
5700	7	25.68157156	26.25262324	24.84830567	24.78738659	23.18657607	26.47404461	24.00221514
6000	8	24.03309323	23.1547823	25.98412711	26.6341547	23.92363679	24.93034163	24.62756551
6300	9	23.58465533	28.03626873	27.87709765	24.06712088	26.11955288	25.53784781	23.39523443
6600	10	23.52724109	24.53280543	22.05694736	24.76979979	25.68081446	24.61793174	25.79761485
6900	11	25.86617882	23.42589303	25.13722252	26.50442458	25.10228901	25.69361436	22.46288921
7200	12	25.54038667	15.70742035	14.99777804	12.19445077	13.42340575	14.57523057	12.28794802
7500	13	26.49547243	10.1908189	15.51242483	11.13168539	3.237942104	10.66775571	12.36067907
7800	14	24.66096823	14.23549084	14.33224595	12.19007794	3.23883466	3.291394175	13.57723025
8100	15	23.72492705	11.91759628	15.38038117	13.14111419	3.084605591	3.144134558	11.6643654
8400	16	24.8158621	9.694516924	12.53876002	13.83236248	3.238771547	3.237542907	11.12328553

8700	17	24.14752454	11.6932799	13.39120569	12.64560456	3.039947879	3.350351683	11.53886527
9000	18	25.6480755	13.63279417	14.88085778	11.07246898	3.317200273	3.242322269	9.614084611
9300	19	25.30923808	14.39403217	13.18833176	14.5854913	3.43954421	3.447261038	8.357326735
9600	20	25.08120415	13.10426953	12.50902767	13.59938462	3.18370227	3.695586553	7.305387861
9900	21	25.29995679	13.03928948	13.7899238	13.62874959	3.718520264	3.038085394	6.473482053
10200	22	26.18893743	11.28943052	14.48920867	14.13065821	3.427194929	3.432672281	3.835579561
10500	23	24.3468903	13.2418126	12.17584461	11.4225559	3.313575831	3.301233502	3.228388287
10800	24	25.36193716	13.34548717	13.71549835	15.53249878	3.16716388	3.539402231	3.0758093
11100	25	24.1228229	11.29977775	12.63274682	13.82336554	3.17382788	3.19661533	3.015899232
11400	26	25.53028126	12.8249078	13.57664065	11.09581398	2.859435353	3.251201787	3.045440434
11700	27	24.47373819	13.93618297	12.20897989	12.15317461	3.049351217	2.973765949	3.492638544
12000	28	25.76958242	12.11509637	11.44396909	11.52373585	3.637639308	2.792563377	3.356118056
12300	29	23.57407367	14.67831669	15.62209477	12.52719358	3.564890957	3.680644306	3.032897159
12600	30	24.10999711	11.86223981	13.52256678	13.86718192	2.99236535	3.061155869	3.319413414
12900	31	25.91480865	11.36867677	13.23085083	13.63379617	2.964028141	3.545903455	3.307295051
13200	32	22.59948932	14.67586562	14.39098379	12.90545159	3.27684602	3.378481579	3.313475185
13500	33	25.76032251	12.19378903	12.94810449	10.19392635	3.493562912	3.311346357	2.875403135
13800	34	24.83239037	13.60954573	13.4842613	14.32022223	2.790773269	3.208674053	3.128169125
14100	35	25.72773831	13.82710314	11.83624374	11.87045714	3.110023242	3.079181154	3.619355691
14400	36	24.6863236	24.60041302	24.56108246	12.01848778	28.9462076	28.94321097	5.901191339
14700	37	24.71896294	25.15088482	29.41306783	12.73448532	25.30041744	25.85852847	4.447783189
15000	38	25.28150488	27.27268803	25.56054503	25.14114342	24.35080796	27.98706065	9.160700794
15300	39	24.34873337	24.58658255	26.44365242	23.46124342	23.69517232	24.45498574	8.306495208
15600	40	23.1707924	24.51390542	25.24500099	25.51984615	25.41825718	24.29072046	9.183810152
15900	41	24.07114905	23.90301112	27.25133941	25.39605523	25.4271806	24.24031811	8.644397308
16200	42	27.82991871	22.92168426	25.74601513	25.11431954	27.25893003	26.47774634	15.82235224
16500	43	25.26935773	23.04046106	25.62540512	23.58251061	24.66131928	25.90921135	13.9271056
16800	44	23.61911416	24.56686635	28.68491385	25.32156923	24.8438796	25.88698299	11.00565

17100	45	22.862223	24.56992925	24.53222025	24.21823467	25.16802667	23.23686506	13.03844532
17400	46	25.26187498	24.02749835	25.68152391	25.66952116	23.44082164	25.44727167	22.94278253
17700	47	24.17636499	25.66045381	25.17736928	22.8354594	26.48066686	24.71396495	26.47153915
18000	48	24.93803477	26.20502773	25.42067338	23.90982364	24.89793858	24.82588425	23.36303962
18300	49	25.73476918	28.38624785	28.01271716	23.49235866	25.09185098	25.69768479	24.07395738
18600	50	24.25959586	24.97432748	24.74927908	26.29580867	27.13694038	26.03822893	23.83957878
18900	51	24.60372699	25.01085151	25.86437917	26.04733582	26.31069671	24.01911752	24.67696453
19200	52	24.3387742	24.24772057	26.3416119	25.42494595	26.17800073	25.78463349	24.59265638
19500	53	26.43384592	26.55920405	24.19584438	25.06309356	24.23277133	23.51137826	26.48719479
19800	54	25.53938747	25.30726718	24.49424855	24.16652394	24.37158635	25.44079386	26.43688564
20100	55	25.0163775	24.6248037	25.46240254	26.31070818	21.52576418	26.21247378	25.29361312
20400	56	23.77630612	26.21072434	25.34783983	28.34093062	25.92972992	24.00615114	24.26250262
20700	57	24.21096305	27.72563897	26.53492362	28.11100774	25.83574235	24.10926802	25.49619238
21000	58	23.57662754	23.13777308	25.85249567	24.15631995	24.63253166	25.62336191	25.64115965
21300	59	25.84697804	25.04296935	25.42987064	23.15436255	25.82288153	24.77300116	25.32689979

SENTIDO DECRESCENTE

Tempo (s)	Num. do Intervalo	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5	Cenário 6	Cenário 7
3600	0	22.36175941	20.68302703	20.29193117	21.34286863	21.18197587	21.69396941	21.41348157
3900	1	22.61317682	23.09275138	19.8122965	20.59205364	20.90380942	22.70848472	20.90233448
4200	2	22.15772622	21.64979525	22.16735022	20.44288703	20.85701933	22.02314375	21.6089542
4500	3	19.89171445	21.33610756	21.75064682	19.70300041	21.03770187	22.31588236	21.46436378
4800	4	21.774478	21.41589547	20.91249609	23.22077635	21.45353288	22.59661973	21.8115391
5100	5	21.10293564	22.55028961	22.76132474	21.6984821	20.94952554	21.1284191	23.0072301
5400	6	21.58636305	20.64236247	20.44052325	21.96646548	22.51869902	20.82092288	21.3449519
5700	7	21.9357047	20.78639249	23.36693929	21.74903402	21.70921649	21.11168494	22.16156486

6000	8	19.40098953	21.77642337	21.62229332	21.49384189	20.04726649	21.76188255	21.48831952
6300	9	22.05770401	23.40437313	22.26725367	19.88851326	22.26172629	21.20151609	22.82636286
6600	10	22.2192078	21.9788807	21.15146	21.27521396	20.40284441	21.44516643	20.37041788
6900	11	21.97984278	21.93995647	23.48366607	22.65708893	21.28433611	21.67778304	20.47417473
7200	12	21.73104499	9.571306519	11.62540753	7.752117536	14.25917137	11.63519369	9.005688931
7500	13	21.9492248	7.55689064	7.025263741	6.76327254	2.880914577	12.09889942	6.41807578
7800	14	21.92738694	7.113315898	6.609921736	7.792514243	2.693904896	2.765298298	6.643886206
8100	15	22.15924626	7.365897165	7.614851936	7.533253034	2.689137704	2.614271125	6.919510943
8400	16	22.12371515	6.897439107	7.003764363	7.273955378	2.701602558	2.784992894	6.8535607
8700	17	20.52083446	7.824500368	7.68661184	7.476964265	2.714356306	2.691549796	6.201226694
9000	18	21.0286634	7.207523787	7.419703159	7.533065299	2.512676673	2.523431708	6.173407908
9300	19	21.3467018	7.668382963	7.801658525	7.180180092	2.712294391	2.745713726	5.106601513
9600	20	22.96239028	7.646892397	7.592110074	7.278202005	2.703940244	2.843421879	5.402738349
9900	21	23.83725997	7.12834101	8.049999869	7.341683063	2.674681938	2.663322236	5.63200407
10200	22	19.9015261	7.481877148	7.521523919	7.185471565	2.839430537	2.626266222	2.952737558
10500	23	20.51333464	7.693975374	7.296383284	6.883907285	2.824654423	2.679616347	2.829630692
10800	24	19.87042815	8.470753232	7.495450401	7.012803393	2.792036117	2.743307583	2.741942447
11100	25	22.24741462	7.233058663	7.286594512	6.911289733	2.720605517	2.667784506	2.768356514
11400	26	20.53581017	7.700796034	7.62314921	7.563375297	2.751900822	2.703331251	2.678394254
11700	27	21.33134898	7.167959796	7.641443878	6.641587329	2.753840023	2.799323496	2.811504374
12000	28	21.91094253	7.888891676	7.38941212	7.016985767	2.813102843	2.696365883	2.779702587
12300	29	22.17742528	7.047395216	7.174045291	7.900470555	2.716361692	2.775682266	2.7729578
12600	30	19.51532811	7.335957307	7.426093031	6.823087262	2.784729806	2.713579656	2.723458098
12900	31	21.0815	8.009018106	7.412878374	6.986554506	2.697046927	2.85570305	2.706012772
13200	32	22.87811438	7.793144827	7.363179377	7.431238322	2.858288374	2.744866207	2.786720233
13500	33	22.92799858	7.262879977	7.769090446	7.279568152	2.692339638	2.676605141	2.873431003
13800	34	22.121757	7.719633973	7.960649822	7.681610511	2.662097722	2.605985168	2.801948185
14100	35	21.31943321	8.282577263	7.274138296	7.251220699	2.813583667	2.725312625	2.806786596

14400	36	21.50817956	19.41182777	19.90434072	6.38443456	28.49014986	29.01706458	4.877509435
14700	37	20.5607582	22.4807514	20.30631779	6.13805882	21.13529985	22.43664586	2.795030509
15000	38	19.8525292	21.52228258	22.74230754	21.08073041	21.73066529	19.75567267	6.913491304
15300	39	22.27772213	21.72794344	20.45834352	20.98984116	21.13546577	20.7918061	5.572017319
15600	40	20.62430037	20.74388754	21.56650478	23.07476127	22.05008068	20.57804756	7.473569499
15900	41	20.66440434	20.25857462	21.66836602	20.74017358	20.07007186	21.01992018	5.473725253
16200	42	22.68990266	21.02167432	20.95359763	20.6976767	20.78770945	21.17462264	7.952714474
16500	43	22.37946669	21.88470983	20.20600237	22.34957898	20.87787808	22.98227497	7.544599643
16800	44	20.72574597	20.58412172	21.47771969	19.82632548	23.02284138	21.75267176	6.759696296
17100	45	19.80175427	21.83255144	21.83082853	20.93834279	24.34444802	20.41169884	6.014155397
17400	46	20.39618714	21.63841973	21.98249811	23.87137629	21.87541314	20.04269293	20.8714372
17700	47	21.43174954	21.35960282	21.5654631	21.88659554	21.84552594	21.75773146	21.19026076
18000	48	20.4906164	20.03305179	22.43498521	21.6087813	22.07660211	21.22978907	22.2395952
18300	49	21.18393422	21.33168825	21.91726528	19.81973337	21.36416932	21.45654837	21.35314135
18600	50	21.46057533	21.60002799	21.66602959	21.27616619	21.94119058	21.56303365	21.85937175
18900	51	21.48908261	22.68379299	20.6956143	21.89074628	22.16905325	23.61249019	22.25241896
19200	52	21.59970577	20.76397917	21.62849038	21.52801522	22.27635334	19.32927098	22.58714898
19500	53	20.33420593	21.65353609	22.44378685	20.47394937	21.66495745	20.78201236	21.20154951
19800	54	22.13638085	21.17310484	21.83042645	22.64192628	21.56387739	20.20101412	21.08429165
20100	55	20.47998423	21.6163349	22.2466907	22.49470478	21.07709242	20.28475968	21.84154121
20400	56	21.07621424	22.15878365	19.55969811	21.73997806	20.95540063	22.69632921	22.82902434
20700	57	21.10302405	21.84642402	21.01594063	21.90442176	22.30130648	21.53694606	21.35006536
21000	58	21.53904167	22.09895099	20.88268238	23.48939213	22.34007489	21.36820672	22.45530072
21300	59	23.45949935	21.55758715	21.46941376	21.1890465	22.17429714	20.71726288	21.52183684

DESVIOS PADRÃO MÉDIOS DO HEADWAYS (M) EM INTERVALOS DE 5 MINUTOS

SENTIDO CRESCENTE

Tempo (s)	Num. do Intervalo	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5	Cenário 6	Cenário 7
3600	0	32.62997184	26.91233197	44.92774535	11.54312103	15.45167	26.49816	37.09942
3900	1	29.96915523	26.11781355	15.35638115	16.71239585	21.41917	44.03782	28.31737
4200	2	24.01514423	27.7704948	13.56286945	23.45250716	34.56163	27.32955	19.11148
4500	3	27.86954754	24.52524347	21.22995412	29.14868911	20.82289	27.38011	21.32396
4800	4	20.00102541	40.33145778	24.00415843	20.53671435	33.12614	25.40165	13.70671
5100	5	22.72847766	21.9163961	12.00597791	35.67567792	34.66926	23.2773	37.50056
5400	6	15.77985255	19.94272609	26.74087055	28.66750291	27.3551	19.77358	31.28449
5700	7	28.25888355	32.95259617	28.29603564	20.21881771	31.95393	21.36136	21.14247
6000	8	13.33791435	34.37545451	34.34542232	22.7442881	24.78612	30.30412	26.69564
6300	9	26.41362778	20.2621217	21.31084301	17.37402002	17.93769	24.76396	26.1885
6600	10	35.726121	21.60494422	27.2212344	33.06915566	12.43304	25.53953	19.66005
6900	11	26.35715437	41.997311	42.53229729	31.4533873	28.5399	22.14407	33.1507
7200	12	19.56494192	21.27389826	15.80326326	16.34196607	39.72845	34.14224	26.95042
7500	13	28.15283159	14.85956796	19.28481673	16.38790878	27.97246	31.07589	26.65516
7800	14	38.11332666	31.30485726	26.46153382	25.91728974	39.6899	45.00486	25.9946
8100	15	26.7325568	26.00160288	15.2167704	21.08442017	24.81468	29.32622	21.51298
8400	16	25.13305727	13.39427497	21.66189139	19.41027265	34.82692	52.66303	19.3408
8700	17	20.53427192	10.53305273	21.81563631	20.28516486	33.47369	36.81795	16.85747
9000	18	20.65695705	23.7890727	28.63263674	30.31285894	53.78952	22.87715	18.88124
9300	19	26.36034461	23.04744424	32.74094604	20.47702438	21.22685	34.67954	29.20235
9600	20	30.86342966	22.84575015	20.69376965	29.75173608	54.37607	26.56439	44.5162
9900	21	14.68825699	25.03494094	21.73676751	10.57850416	38.64807	25.10854	22.44035
10200	22	26.45447319	33.86434462	13.5954851	24.02483376	38.79295	45.26796	38.27828
10500	23	36.39589181	14.62546769	15.15529811	12.72239776	19.66522	36.99968	43.58886
10800	24	25.24686676	16.07980634	22.56981265	45.80851752	36.32085	61.50532	18.4295

11100	25	16.71444826	12.71925627	18.84495913	18.06593452	40.13179	45.96162	37.75645
11400	26	34.11731603	13.35274637	21.06271351	17.50534587	46.29401	40.53779	44.93411
11700	27	32.69410445	16.08794248	11.70790074	26.39747899	22.44176	18.43067	34.06505
12000	28	17.80802674	11.90826083	24.93537007	23.14360581	35.94614	30.30629	43.28091
12300	29	32.57015697	11.13270734	18.94398156	23.77081829	39.12722	25.93125	28.22864
12600	30	23.17804179	23.97778383	15.97508803	16.73687844	38.8099	38.23923	31.58743
12900	31	30.55517178	16.98045425	19.93495013	23.84657788	26.67172	29.54673	25.25189
13200	32	11.34708646	26.52703627	16.01706786	15.8643457	22.27572	25.84671	30.74847
13500	33	38.24928391	13.47709922	29.02143919	14.42102865	28.24151	31.5109	53.16397
13800	34	16.58376209	14.23557914	27.72231845	13.37473318	38.30187	46.85437	29.66766
14100	35	24.85871251	33.01177679	9.515631439	15.8021059	29.59725	48.37346	38.47469
14400	36	17.39400446	10.20038026	25.75942798	24.24505098	41.60174	24.53593	19.95733
14700	37	44.48958353	24.92976746	39.06267572	17.70665708	21.81532	37.48363	31.46969
15000	38	24.68894713	26.95958402	35.59991532	21.65685623	20.56161	31.06177	34.48222
15300	39	26.48600693	20.13962946	32.23544476	19.52736842	39.43553	33.557	27.3848
15600	40	27.73967979	24.68735474	21.72643513	22.0127238	21.95103	22.97006	37.61681
15900	41	17.8580234	21.32709649	24.78398879	27.30101058	29.93361	25.40142	17.94592
16200	42	20.54995078	17.91813667	17.94266779	12.90443558	15.81536	26.71599	18.8321
16500	43	24.62160425	28.80471376	27.47843673	20.59009743	28.40415	32.24882	26.08228
16800	44	16.99150432	24.48649199	27.97815656	21.3781606	17.57874	32.53004	39.66478
17100	45	32.61564666	37.42213265	18.04095769	20.58047888	22.9943	22.12939	27.67496
17400	46	35.66683691	19.07769528	33.45086438	28.78695873	15.47956	29.45537	33.26489
17700	47	24.21676306	36.00756778	17.10628299	18.07263046	22.61249	20.01605	33.82071
18000	48	25.88309251	23.21500588	27.57881085	25.02248165	24.67348	28.01574	27.36409
18300	49	20.85712091	26.19962019	32.0024765	34.15946421	21.96883	20.66742	35.81248
18600	50	28.58483545	18.7190899	21.69666587	23.82895316	16.34012	33.33061	30.74434
18900	51	13.88454504	22.75260188	32.59258945	32.06753052	18.9158	42.8353	34.31474

19200	52	23.34212634	27.56970878	57.4890254	27.34043132	13.27207	19.25149	16.93693
19500	53	23.4490963	37.58064013	14.81579659	19.99704492	21.87359	18.61486	25.88125
19800	54	28.71288038	33.03205239	29.30693986	22.67624821	27.99327	24.50947	25.29016
20100	55	16.91232319	26.46010401	22.07825146	21.75806929	15.17572	36.93625	25.06934
20400	56	11.30592454	45.75498008	27.67264154	34.72706676	46.3053	31.93184	36.42842
20700	57	21.02780591	28.27986627	28.7661071	19.91498751	42.20807	15.82616	23.34638
21000	58	33.33223657	12.90008269	23.52408065	24.69394701	25.36442	19.20386	16.31444
21300	59	20.46046159	23.07006451	17.33858241	18.5991329	15.40738	26.41008	18.39436

SENTIDO DECRESCENTE

Tempo (s)	Num. do Intervalo	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5	Cenário 6	Cenário 7
3600	0	29.90714	17.14523	10.53435	24.84362	17.10159	22.3566	20.60435
3900	1	22.96486	25.31988	17.58444	17.13615	14.85359	25.69453	16.07201
4200	2	17.23998	19.96462	17.56174	18.64033	13.84667	20.88512	24.56661
4500	3	23.16637	10.79052	15.15928	28.84126	12.9379	14.52231	25.18037
4800	4	8.861163	22.65334	23.55279	32.22625	21.10642	21.03646	14.32083
5100	5	7.323198	24.61116	29.42359	14.72294	21.95509	20.25302	26.15096
5400	6	26.74892	16.4551	15.95785	32.59629	23.00067	12.13628	17.51686
5700	7	11.63798	24.07503	16.00829	16.44002	26.81006	20.75322	22.7692
6000	8	25.18532	21.2751	15.51601	23.06133	22.32397	11.16351	18.95893
6300	9	20.31628	31.45954	23.63999	14.16362	26.66142	13.0778	28.18534
6600	10	17.55901	26.26901	12.15387	22.69615	27.86671	20.15184	17.54062
6900	11	25.53113	22.51964	17.07188	23.71468	31.90646	20.18997	41.40419
7200	12	11.29766	16.24774	14.19631	12.16058	25.6732	19.15183	16.67281
7500	13	17.9341	14.11341	11.73156	10.03567	43.45359	20.18205	11.30045
7800	14	15.97234	15.65541	8.157333	16.30098	23.52085	29.7679	11.39953
8100	15	18.51807	12.00076	12.9535	16.74495	18.83201	36.9545	17.49478
8400	16	22.05324	9.66885	17.01645	15.72239	34.59325	23.40328	23.39587

8700	17	17.3869	16.66513	6.373968	11.05938	21.74544	28.56138	22.12253
9000	18	21.90527	12.57662	8.7091	11.64379	32.36615	27.23837	20.13696
9300	19	13.1899	9.508368	13.28058	17.00137	32.90606	31.24145	14.20193
9600	20	18.94793	14.31259	15.80761	13.02887	29.09633	26.9472	31.75227
9900	21	34.52187	8.508837	20.88494	13.38509	31.39993	20.62926	32.96676
10200	22	17.72023	13.90127	16.80641	9.831151	27.56339	31.75869	35.27101
10500	23	22.05202	10.81925	10.99754	10.2179	45.78607	29.3388	38.6732
10800	24	28.32135	10.00781	6.894937	15.41119	25.46432	21.32807	29.59918
11100	25	24.07478	15.92384	12.3393	12.08079	29.89841	37.57739	24.9133
11400	26	17.28101	10.2566	13.80139	12.87369	27.41276	20.46891	32.38254
11700	27	27.28202	12.6968	14.47488	10.38376	35.50508	36.58183	14.41158
12000	28	12.18793	13.92215	18.80296	10.91693	25.39456	31.96523	43.95313
12300	29	11.03368	19.23176	5.770855	8.689177	12.69967	28.14669	26.46341
12600	30	26.77369	6.262717	13.38892	12.30101	33.02892	34.12425	33.31585
12900	31	16.65072	19.78807	11.73027	13.51014	26.61789	28.56914	38.24817
13200	32	18.2554	12.68133	13.8458	9.15384	22.33258	32.68538	21.60323
13500	33	13.9498	10.39965	9.686479	23.91464	31.22227	35.98577	32.50607
13800	34	26.07709	12.28192	15.27833	18.46915	23.07094	28.17175	10.39588
14100	35	10.1471	11.93859	13.0885	16.53896	22.60381	36.13576	28.78688
14400	36	20.19594	22.05213	16.55905	11.845	29.64396	13.65134	15.23696
14700	37	23.29975	15.16316	24.44804	10.12455	13.83953	19.60708	22.60281
15000	38	38.26436	16.30434	21.67483	12.28036	26.50322	16.5942	16.57755
15300	39	16.21965	21.22615	14.73912	17.76817	17.20935	15.71426	15.40837
15600	40	21.04798	18.59874	20.22797	24.67211	19.32314	17.85492	8.35767
15900	41	14.64144	14.98505	19.71638	29.14467	25.03856	20.34158	13.51612
16200	42	8.962447	23.13754	12.18473	16.16308	14.44668	21.43711	17.43435
16500	43	17.01858	17.83535	21.08274	17.40295	22.06825	22.50693	13.12623

16800	44	23.50612	27.05003	20.10633	20.53105	23.76007	16.43671	9.189607
17100	45	12.67307	20.77103	17.62377	21.39784	13.31132	21.36805	17.46107
17400	46	22.65525	10.43393	19.74256	21.58033	16.65491	21.48848	17.50549
17700	47	23.49418	25.86333	22.81285	23.27177	21.54904	21.78162	17.34467
18000	48	13.4881	13.46534	14.90435	23.58409	13.24976	17.90264	24.81494
18300	49	29.42742	13.5744	11.89758	18.59948	21.49614	14.2938	21.81213
18600	50	15.72897	16.86063	22.53469	18.62284	17.25808	21.41989	21.37637
18900	51	16.92654	27.9933	22.09657	15.52982	18.2018	16.90626	21.5965
19200	52	18.27879	20.18831	22.30216	18.6047	16.38473	16.33682	12.36072
19500	53	16.02387	21.82616	16.37569	15.1116	24.68172	18.52808	16.60999
19800	54	15.86204	21.42197	15.96625	18.66729	32.631	18.81558	24.71054
20100	55	17.36806	12.95365	13.03729	22.67052	16.93154	18.9473	13.10709
20400	56	22.95336	12.64073	14.83636	11.577	21.4235	29.50139	10.57547
20700	57	15.2774	20.69191	30.37136	29.85304	24.12109	12.62204	15.16822
21000	58	18.6587	12.79205	14.79719	18.38281	26.11786	28.60808	33.56806
21300	59	18.51698	18.26571	17.696	16.72991	20.79912	29.99054	41.10689

TEMPOS DE VIAGEM MÉDIOS (s) EM INTERVALOS DE 5 MINUTOS

Tempo (s)	Num. do Intervalo	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5	Cenário 6	Cenário 7
3600	0	28260.51	27899.68	28373.27	26513.29	26079.85	29745.03	26838.97
3900	1	27630.36	27394.69	27531.54	26349.15	28044.61	29030.54	28437.33
4200	2	27413.96	27542.62	26733.18	27158.34	29079.54	27692.8	29170.72
4500	3	28322.82	28189.12	27685.3	27471.02	27620.17	26328.28	29013.59
4800	4	27450.84	28814.76	28433.44	27440.97	26821.22	26956.23	28600.19
5100	5	26917.82	27413.93	27942.81	27205.45	25948.09	27339.06	27072.45
5400	6	27721.85	28004.01	27266.83	27143.21	26757.36	28179.13	26526.34
5700	7	28171.87	27647.24	26974.33	28150.11	26359.23	28045.06	27107.09
6000	8	27009.41	28067.36	27700.76	27503.48	28089.47	26984.31	26513.2

6300	9	26594.22	27833.38	27359.52	27752.62	27737.15	27576.6	26785.5
6600	10	26312.86	26213.37	26401.92	27594.4	27594.39	27959.54	26432.16
6900	11	27065.85	26518.42	25187.19	28160.72	26765.47	27292.26	26119.23
7200	12	27495.54	26193.68	25163.43	27765.28	27207.55	27048.15	26137.66
7500	13	27179.65	27549.2	28233.03	27207.14	33197.17	29538.5	28149.5
7800	14	26896.46	28638.49	29190.29	27969.48	44546.14	35865.76	28262
8100	15	25666.66	29963.5	28783.28	26546.89	45326.79	43014.43	27685.78
8400	16	26879.87	27231.95	28188.19	27514.74	44018.03	42538.49	27684.66
8700	17	29372.88	26893.88	27873.25	28793.93	43664.78	42910.68	29873.39
9000	18	27033.69	27458.99	28255.79	29082.68	44436.27	44632.98	30227.87
9300	19	26009.82	28205.82	27455.73	29464.96	44258.93	45095.32	30315.02
9600	20	27194.51	29447.48	27133.49	29094.23	43474.79	45153.77	33548.45
9900	21	27287.24	30028.33	27494.22	28109.74	43428.32	43615.88	35897.16
10200	22	28507.65	28833.43	26376.31	28174.43	45103.76	43109.67	39523.95
10500	23	29824.63	27866.11	27382.78	27701.55	44936.72	44118.67	43467.34
10800	24	28497.51	26969.92	27900.46	28502.66	45129.56	44464.9	44005.61
11100	25	26962.61	27265.52	27822.4	28807.79	45170.49	44224.37	42975.83
11400	26	27236.74	27613.09	28226.64	28183.47	45308.93	44397.4	43189.55
11700	27	27800.16	27986.29	27684.02	29252.33	45153.75	44478.85	43466.67
12000	28	27869.4	29454.03	27353.43	28604.19	44752.36	43016.43	43633.91
12300	29	27184.07	29264.05	27796.74	28007.9	44959.08	42423.79	43319.54
12600	30	26565.59	28490.68	27770.71	28066.02	45264.4	43091.34	43167.61
12900	31	26547.99	27492.39	27584.58	28782.9	44730.41	43897.26	44624.77
13200	32	26423.92	28209.8	28153.99	28347.13	44766.64	44539.55	44305.21
13500	33	27458.49	27739.86	28194.9	27138.43	45283.1	45117.57	42575.37
13800	34	26994.41	28654.78	26941.42	26476.48	44645.45	43917.24	42335.9
14100	35	27643.56	28221.92	27854.69	28091.66	44483.76	42319.16	43454.02

14400	36	27520	28226.04	28681.25	28951.45	44057.17	41445.89	44607.7
14700	37	27105.57	28203.28	26372.83	28791.22	41398.07	37157.12	44630.13
15000	38	28539.82	28411.48	26390.74	29966.95	28422.34	26991.47	39349.86
15300	39	29395.74	27985.91	26043.09	25788.53	26602.63	27761.11	37767.91
15600	40	27753.63	26783.36	24916.84	26046.99	27933.1	27243.92	33695.82
15900	41	27548.99	27338.76	26197.78	28319.05	26946.31	27266.89	31932.99
16200	42	27687.28	28059.67	27166.58	28715.71	27539.21	27232.79	31731.17
16500	43	27458.67	27857.42	27509.79	27428.18	28416.31	27741.97	28492.56
16800	44	28050.56	26440.01	26386.9	27329.88	26677.63	27427.82	27473.68
17100	45	28129.7	26560.53	27667.05	28058.65	25896.34	26820.53	27826.34
17400	46	26798.14	27426.04	27577.76	26355.27	25957.46	26996.85	28622.52
17700	47	26146.84	27182.78	27553	25817.26	27067.24	27985.81	27524.5
18000	48	27738.35	27256.36	28199.2	26446.3	26613.9	28142.97	26810.09
18300	49	27566.92	27757.07	28179.82	26192.51	26351.14	28811.91	26589.81
18600	50	26671.42	27619.93	28161.29	26916.14	27187.93	28671.92	26989.03
18900	51	28027.24	27302.7	27702.21	27675.45	27572.97	26806.88	26781.35
19200	52	28107.95	26932.13	26915.66	27327.1	29016.26	26069.05	27270.79
19500	53	26887.82	26232.1	26969.35	27727.29	29301.77	26983.26	28308.72
19800	54	25873.91	26430.36	27272.31	26850.5	28944.92	27370.36	28403.17
20100	55	25919.5	27089.87	26660.79	26924.83	26835.8	27309.21	27401.35
20400	56	25993.88	26727.61	27290.7	28666.78	26701.5	28726.22	26942.49
20700	57	26159.45	28511.78	27605.12	27483.29	25554.84	27505.36	26573.06
21000	58	26939.79	27438.03	25656.63	26465.42	25832.8	27376.52	27195.35
21300	59	26797.93	26402.93	26612.6	26197.42	27536.09	27043.84	27661.65