



NOVA
NOVA SCHOOL OF
SCIENCE & TECHNOLOGY

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA CIVIL

DUARTE MANUEL DE CASTRO COELHO APPLETON
FIGUEIRA
Licenciado em Ciências de Engenharia Civil

ESTRADAS PARA VEÍCULOS AUTÓNOMOS: ANÁLISE CRÍTICA DOS REQUISITOS DE PROJETO

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL

Universidade NOVA de Lisboa
Setembro, 2023



Estradas para veículos autónomos: análise crítica aos requisitos de projeto

DUARTE MANUEL DE CASTRO COELHO APPLETON FIGUEIRA

Licenciado em Ciências de Engenharia Civil

Orientador: Rui A. L. B. Micaelo,
Professor Associado, Universidade NOVA de Lisboa

Júri:

Presidente: Filipe Pimentel Amarante dos Santos,
Professor Auxiliar, Universidade NOVA de Lisboa

Arguentes: Simona Fontul,
Professora Auxiliar Convidada, Universidade NOVA de Lisboa

Orientador: Rui A. L. B. Micaelo,
Professor Associado, Universidade NOVA de Lisboa

Membros: Rui A. L. B. Micaelo,
Professor Associado, Universidade NOVA de Lisboa
Simona Fontul,
Professora Auxiliar Convidada, Universidade NOVA de Lisboa

ESTRADAS PARA VEÍCULOS AUTÓNOMOS: ANÁLISE CRÍTICA AOS REQUISITOS DE PROJETO

Copyright © Duarte Appleton Figueira, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

Quero expressar o meu sincero agradecimento a todas as pessoas que desempenharam um papel crucial na realização da minha tese de mestrado.

Ao corpo docente de engenharia civil, em especial ao Professor Rui Micaelo, pela orientação e apoio incansável.

À minha família, em especial aos meus pais, cujo apoio e sacrifício tornaram possível esta jornada académica.

Aos meus colegas e amigos, com destaque para o Afonso, André, Duarte, Tiago e Tomás, pela camaradagem e pelo incentivo nos momentos mais desafiantes.

Por fim, à Lucia, que, mesmo sem perceber, foi uma inspiração constante para alcançar este objetivo.

RESUMO

A presente dissertação tem como objetivo realizar uma análise crítica dos requisitos de projeto para estradas destinadas a veículos autónomos. A ascensão dos veículos autónomos como uma inovação revolucionária no setor dos transportes exige uma compreensão aprofundada das necessidades e desafios envolvidos na adaptação das estradas para esse novo paradigma da mobilidade.

Nesta dissertação, abordam-se uma variedade de aspetos relacionados com requisitos de projeto das estradas para veículos autónomos. São considerados fatores cruciais, como o desempenho dos veículos e a infraestrutura rodoviária tendo isso em conta, a sinalização adaptada aos veículos autónomos e a infraestrutura de recarga para veículos elétricos.

Ao analisar criticamente esses requisitos de projeto, identificaram-se os desafios e as oportunidades envolvidas na construção de estradas adequadas aos veículos autónomos. Além disso, visa-se otimizar a integração desses veículos no ambiente rodoviário, promovendo uma mobilidade mais segura, eficiente e sustentável.

Os resultados obtidos neste estudo contribuem para a formulação de diretrizes e padrões que poderão vir a definir o planeamento e a construção de estradas destinadas a veículos autónomos, especialmente em Portugal. Destaca-se a importância de adaptar a infraestrutura existente e preparar o ambiente rodoviário para a chegada em massa dos veículos autónomos, visando uma mobilidade mais inteligente.

Esta dissertação possui relevância significativa para a engenharia civil, uma vez que oferece uma base sólida de conhecimento para os profissionais do setor lidarem com os desafios impostos pela existência de veículos autónomos. Ao compreendermos e atendermos aos requisitos de projeto específicos dessas estradas, estaremos a impulsionar a evolução da

infraestrutura rodoviária do país, preparando-a para o futuro da mobilidade e promovendo uma experiência de transporte mais eficiente e segura.

Palavras chave: Veículos autônomos; estradas; requisitos de projeto; análise crítica; infraestrutura rodoviária; mobilidade; segurança; eficiência; sustentabilidade;

ABSTRACT

The present thesis aims to conduct a critical analysis of design requirements for roads intended for autonomous vehicles. The rise of autonomous vehicles as a revolutionary innovation in the transportation sector requires a deep understanding of the needs and challenges involved in adapting roads to this new mobility paradigm.

In this thesis, a variety of aspects related to the design requirements of roads for autonomous vehicles are addressed. Crucial factors, such as autonomous vehicle performance and road infrastructure thought for them, are taken into account, along with signage tailored to autonomous vehicles and electric vehicle charging infrastructure.

By critically analyzing these design requirements, challenges, and opportunities for constructing roads suitable for autonomous vehicles have been identified. Furthermore, the goal is to optimize the integration of these vehicles into the road environment, promoting safer, more efficient, and sustainable mobility.

The results obtained in this study will contribute to the formulation of guidelines and standards that may define the planning and construction of roads intended for autonomous vehicles, particularly in Portugal. The importance of adapting existing infrastructure and preparing the road environment for the mass arrival of autonomous vehicles is emphasized, aiming for smarter mobility.

This dissertation holds significant relevance for civil engineering, as it provides a solid knowledge base for professionals in the sector to address the challenges posed by the implementation of autonomous vehicles. By understanding and addressing the specific design requirements of these roads, we will drive the evolution of the road infrastructure, preparing it for the future of mobility and promoting a more efficient and secure transportation experience.

Keywords: Autonomous vehicles; roads; design requirements; critical analysis; road infrastructure; mobility; safety; efficiency; sustainability.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Enquadramento	1
1.2	Objetivos	2
1.3	Estrutura.....	3
2	DIMENSÕES DOS VEÍCULOS AUTÓNOMOS	5
2.1	O veículo autónomo	5
2.1.1	Objetivos, benefícios e problemas dos veículos autónomos.....	7
2.1.2	Evolução e perspetiva de futuro.....	12
2.1.3	Infraestrutura	13
2.2	Questionário.....	14
2.2.1	Organização e tratamento de respostas.....	14
2.2.2	Questão 1	15
2.2.3	Questão 2.....	16
2.2.4	Questão 3.....	17
2.2.5	Questão 4.....	18
2.3	Revisão sistemática e meta-análise.....	19
2.3.1	Método	19
2.3.2	Resultados	20
2.3.3	Conclusão.....	21

3	COMPONENTES DE UM PROJETO DE ESTRADAS ATUAL.....	23
3.1	Tráfego.....	23
3.2	Velocidade.....	24
3.2.1	Velocidade base.....	24
3.2.2	Velocidade de tráfego.....	25
3.3	Visibilidade.....	27
3.3.1	Distância de visibilidade de paragem.....	27
3.3.2	Distância de visibilidade de decisão.....	28
3.3.3	Distância de visibilidade de ultrapassagem.....	29
3.4	Geometria.....	30
3.4.1	Traçado em planta.....	30
3.4.2	Traçado em perfil longitudinal.....	34
3.4.3	Perfil transversal.....	40
3.5	Comodidade e segurança.....	44
3.5.1	Homogeneidade.....	45
3.5.2	Comodidade física.....	45
3.5.3	Comodidade ótica.....	45
4	COMPONENTES DE UM PROJETO DE ESTRADAS PARA VEÍCULOS AUTÓNOMOS.....	47
4.1	O tráfego dos veículos autónomos.....	48
4.2	A velocidade dos veículos autónomos.....	48
4.3	A visibilidade dos veículos autónomos.....	50
4.3.1	Distância de visibilidade de paragem dos veículos autónomos.....	50
4.3.2	Distância de visibilidade de decisão dos veículos autónomos.....	52
4.3.3	Distância de visibilidade de ultrapassagem dos veículos autónomos.....	53

4.4	Geometria das estradas para veículos autónomos.....	54
4.4.1	Traçado em planta.....	54
4.4.2	Traçado em perfil longitudinal.....	58
4.4.3	Perfil transversal	63
4.4.4	Exemplo de estrada para veículos autónomos.....	66
4.4.5	Análise geral.....	67
4.5	Comodidade e segurança dos veículos autónomos.....	68
4.5.1	Homogeneidade.....	68
4.5.2	Comodidade física	68
4.5.3	Comodidade ótica	69
4.5.4	Novas preocupações	69
4.6	Sinalização para veículos autónomos.....	70
4.6.1	Sinalização vertical.....	70
4.6.2	Sinalização horizontal.....	71
4.7	Pavimento para os veículos autónomos	72
4.7.1	Variação lateral	72
4.7.2	Sem variação lateral.....	73
4.8	Recarregamento dos veículos autónomos.....	73
5	CONCLUSÕES.....	77
	BIBLIOGRAFIA.....	77

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Percentagens de cada faixa etária	14
Figura 2.2 - Respostas à 1ª questão	15
Figura 2.3 - Respostas à 2ª questão	16
Figura 2.4 - Respostas à 3ª questão	17
Figura 2.5 - Respostas à 4ª questão	18
Figura 2.6 - Resultados PRISMA.....	20
Figura 2.7 - Evolução do número de artigos publicados por ano	21
Figura 4.1 - Diferença de Hc entre VCs, VAs e VACs.....	57
Figura 4.2 - Ilustração da diferença do raio na concordância convexa	60
Figura 4.3 - Ilustração da diferença do raio na concordância côncava	62
Figura 4.4 - Túnel para veículos autônomos.....	65
Figura 4.5 - Esquema de alinhamento reto para VCs, VAs e VACs.....	67
Figura 4.6 - Via para carregamento (Bourzik et al., 2022).....	75

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 - Tecnologia nos veículos autónomos e respetiva função (Martínez-Díaz et al., 2019)	7
Quadro 3.1 - Velocidades Base	25
Quadro 3.2 - Velocidade de tráfego para cada velocidade base.....	26
Quadro 3.3 - Coeficientes de atrito longitudinal.....	28
Quadro 3.4 - Coeficientes de atrito transversal	32
Quadro 3.5 - Inclinações máximas dos trainéis	35
Quadro 3.6 - Extensão crítica para cada inclinação.....	36
Quadro 3.7 - Extensão de transição final	40
Quadro 3.8 - Sobrelevação em relação ao raio	42
Quadro 3.9 - Obliquidade da transição da sobrelevação em relação à velocidade de tráfego	43
Quadro 3.10 - Largura das bermas pavimentadas.....	44
Quadro 4.1 - Redução da distância de visibilidade de paragem - VAs	51
Quadro 4.2 - Redução da distância de visibilidade de paragem - VACs	52
Quadro 4.3 - Redução da distância de visibilidade de decisão	53
Quadro 4.4 - Redução de Hc.....	56
Quadro 4.5 - Redução do raio mínimo de concordâncias convexas.....	59
Quadro 4.6 - Redução do raio mínimo de concordâncias côncavas.....	61

GLOSSÁRIO

<i>Software</i>	Programa de computador ou conjunto de instruções que permite ao hardware realizar tarefas específicas.
<i>Hardware</i>	Componentes físicos de um computador ou dispositivo eletrónico.
<i>Cruise-Control</i>	Sistema automático que mantém a velocidade do veículo constante sem a necessidade de se pressionar o pedal do acelerador.
<i>Platooning</i>	Prática de veículos autónomos que circulam com reduzida distância entre si, numa formação compacta.
<i>Ridesharing</i>	Compartilhamento de viagens, em que as pessoas dividem um veículo para alcançar destinos semelhantes.
<i>Carsharing</i>	Sistema de compartilhamento de automóveis, em que os utilizadores alugam veículos por períodos curtos e pagam apenas pelo tempo de uso.
<i>Autonomous</i>	Sistemas ou dispositivos que operam independentemente, sem intervenção humana direta, tomando decisões e realizando tarefas de forma automática.

Vehicles Máquinas projetadas para transporte de pessoas ou carga.

Infrastructure Conjunto de elementos físicos e sistemas necessários para o funcionamento de uma área ou serviço específico.

SIGLAS

VC	Veículo Comum
VA	Veículo Autônomo
VAC	Veículo Autônomo Conectado
LIDAR	<i>Light Detection and Ranging</i> - Detecção e Alcance por Luz
GPS	<i>Global Positioning System</i> - Sistema de Posicionamento Global
INS	<i>Inertial Navigation System</i> - Sistema de Navegação Inercial
V	Velocidade
VB	Velocidade Base ou de projeto
VT	Velocidade de Tráfego
VCI	Velocidade de Circulação não Impedida
IP	Itinerário Principal
IC	Itinerário Complementar
EN	Estrada Nacional
ER	Estrada Regional
DD	Distância de visibilidade de Decisão
DDva	Distância de visibilidade de Decisão de veículos autônomos
DP	Distância de visibilidade de Paragem
DPva	Distância de visibilidade de Paragem de veículos autônomos

DPvac	Distância de visibilidade de Paragem de veículos autónomos conectados
DU	Distância de visibilidade de Ultrapassagem
R	Raio da curva
B	Comprimento do Bisel
S_L	Sobrelargura
Se	Sobrelevação
STCA	<i>Symmetric Two-lane Cellular Automation</i> - autómato celular simétrico de duas vias.
CACC	<i>Cooperative Adaptive Cruise Control</i> - sistema de controle de cruzeiro adaptativo cooperativo
Hc	Distância mínima de afastamento da obstrução numa curva
Hc_{va}	Distância mínima de afastamento da obstrução numa curva para VAs

SÍMBOLOS

α	Ângulo de deflexão
Δi	Obliquidade
R_v	Raio das concordâncias verticais
L_t	Extensão de transição final
f_l	Coefficiente de atrito longitudinal
f_t	Coefficiente de atrito transversal
i	inclinação do trainel
i_t	Inclinação transversal da estrada
r	Raio

INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

Na era atual de avanços tecnológicos, os veículos autónomos têm emergido como uma das inovações mais promissoras no campo dos transportes. Equipados com sistemas de inteligência artificial e sensores avançados. Estes veículos prometem revolucionar o mundo dos transportes rodoviários, oferecendo maior eficiência, segurança e conforto. No entanto, para que essa transformação se torne realidade, é fundamental considerar o impacto desses veículos nas estradas em que irão circular. Neste contexto, a presente dissertação tem como objetivo realizar uma análise crítica dos requisitos de projeto, essencialmente, o traçado das estradas destinadas a veículos autónomos.

As estradas desempenham um papel fundamental para qualquer veículo, no entanto, ainda mais quando se consideram veículos autónomos. Não são apenas vias de trânsito, mas também plataformas para a interação segura e eficiente entre os veículos e o ambiente circundante. Essas vias devem ser projetadas e adaptadas para atender às necessidades específicas dos veículos autónomos, considerando-se aspetos como comunicação veículo-infraestrutura, sinalização inteligente, infraestrutura de recarga e muito mais.

A análise crítica dos requisitos de projeto para estradas destinadas a veículos autónomos permitirá identificar desafios e oportunidades para o desenvolvimento de uma infraestrutura de suporte adequada. Tal análise facilitará a integração eficiente dos veículos autónomos no ambiente rodoviário, contribuindo para a otimização dos sistemas de transporte, redução de congestionamentos e aumento da segurança nas estradas.

Deste modo, esta dissertação assume uma importância inegável, uma vez que visa fornecer uma base sólida para a compreensão dos requisitos de projeto das estradas para veículos autônomos. Os resultados deste estudo crítico proporcionam diretrizes e padrões que orientam o planejamento e a construção de estradas adequadas ao transporte automóvel futuro.

Finalmente, esta dissertação contribui também para a compreensão das necessidades e desafios inerentes à adaptação das estradas para veículos autônomos, destacando sua importância e relevância na engenharia civil.

1.2 Objetivos

Esta dissertação tem como objetivo a análise crítica dos requisitos de projeto de estradas atuais e as possíveis ou necessárias alterações dos mesmos quando ou se se der a alteração total ou parcial para veículos autônomos. Deste modo, é também necessário analisar as várias vertentes dos veículos autônomos, nomeadamente a perspectiva de futuro: como vão evoluir os veículos em si, como vai evoluir o seu uso e as tecnologias envolventes nos veículos e na infraestrutura rodoviária.

Para além disso são analisadas as capacidades de condução dos veículos autônomos tendo em conta o *software* e *hardware* dos mesmos comparando com a condução humana.

Com tudo isto, será possível definir os requisitos de projeto para veículos autônomos, tendo em conta os requisitos atuais, nomeadamente a capacidade humana e a capacidade dos veículos de executar várias funções.

Por fim são abordados os possíveis desenvolvimentos futuros relativos ao tema deste estudo

1.3 Estrutura

A tese será organizada em cinco capítulos principais, cada um abordando aspectos específicos relacionados com os veículos autônomos e as suas implicações na infraestrutura rodoviária.

- **Capítulo 1: Introdução**

No primeiro capítulo, a introdução contextualiza o tema da pesquisa, destacando a relevância dos veículos autônomos no contexto atual e no futuro da mobilidade e da engenharia civil. Além disso, apresenta os objetivos da tese, delineando a abordagem utilizada para a análise crítica dos requisitos de projeto para estradas de veículos autônomos. Por fim, é feita uma breve descrição da organização da tese, delineando os conteúdos de cada capítulo subsequente.

- **Capítulo 2: Dimensões dos Veículos Autônomos**

O segundo capítulo aborda as perspectivas para os veículos autônomos, explorando as principais tendências tecnológicas e inovações que moldam o desenvolvimento desses veículos. São discutidas as dimensões do *software* e *hardware* utilizados nos veículos autônomos, sensores e sistemas de navegação. Além disso, esse capítulo explora as diversas perspectivas de uso e integração dos veículos autônomos.

- **Capítulo 3: Componentes de projeto de estradas atuais**

No terceiro capítulo são apresentados os requisitos de projeto para estradas atualmente existentes, nomeadamente os critérios e os pressupostos considerados atualmente para desenvolver os mesmos.

- **Capítulo 4: Componentes de projeto de estradas para veículos autônomos**

O quarto, e mais importante capítulo concentra-se na análise crítica dos requisitos de projeto, especialmente, do traçado, para estradas destinadas aos veículos autônomos. Com base na

análise realizada nos capítulos anteriores, são propostas soluções e adaptações para a infraestrutura rodoviária de forma a atender às necessidades específicas desses veículos. A discussão contempla aspectos como os limites dos veículos autônomos, comparando com os impostos pelos condutores humanos, e a sua influência sobre o traçado, a sinalização inteligente, a infraestrutura de carregamento energético e outras exigências relevantes para garantir a segurança, eficiência e sustentabilidade da circulação dos veículos autônomos.

- **Capítulo 5: Conclusão**

No capítulo de conclusão são sumarizados os principais resultados do trabalho e as conclusões extraídas da análise crítica dos requisitos de projeto, principalmente, do traçado, de estradas para veículos autônomos.

DIMENSÕES DOS VEÍCULOS AUTÓNOMOS

No presente capítulo será introduzido o veículo autónomo e serão abordadas as várias dimensões dos mesmos, nomeadamente o que é um veículo autónomo, os objetivos, benefícios e problemas inerentes aos mesmos, a evolução dos veículos, as perspetivas de futuro e ainda a infraestrutura pensada para os mesmos.

2.1 O veículo autónomo

Os veículos autónomos definem-se como veículos capazes de operar em segurança com a ajuda de sensores e *software* para controlar, navegar e dirigir o veículo sem interferência de humanos (Aryal, 2020).

Em teoria, um veículo só pode ser considerado autónomo quando todas as tarefas dinâmicas de condução, em todos os ambientes de condução, podem ser realizadas pelos sistemas do veículo. De acordo com a Política Federal de Veículos Automatizados do Departamento de Transportes dos EUA, um veículo é denominado VA (Veículo Autónomo) se possuir sistemas automatizados dos níveis 3 a 5. No entanto, estes níveis de autonomia não são estritamente mantidos na literatura, e qualquer nível de autonomia é referido como autónomo (Faisal et al., 2019). Ao longo deste estudo, o termo VA referir-se-á apenas aos sistemas automatizados dos níveis 3 a 5.

Os níveis de automação são definidos pela (*Federal Automated Vehicles Policy Accelerating the Next Revolution In Roadway Safety*, 2016) da seguinte forma:

- Nível 0, em que o veículo é controlado totalmente pelo condutor ao ser auxiliado pelo veículo, mas este não controla o veículo de qualquer maneira.

- Nível 1, em que algumas funções do controlo são automatizadas, mas sempre independentemente. Estas funções reduzem a necessidade de controlo por parte do condutor, mas nunca permitirão que o mesmo deixe de controlar o veículo. As funções automatizadas podem ser por exemplo *cruise control* ou sistema de assistência à permanência na via de circulação.
- Nível 2, em que duas ou mais funções primárias de controlo funcionam em simultâneo e dependem umas das outras. Neste nível de automatização o condutor pode não estar a controlar o veículo constantemente, mas tem de estar pronto a fazê-lo rapidamente.
- Nível 3, em que os veículos podem operar autonomamente em segurança, mas apenas em certas condições, sendo necessário o condutor estar pronto a tomar o controlo caso necessário.
- Nível 4, em que o veículo pode operar autonomamente exceto quando o cenário se altera, para que haja tempo suficiente para que o sistema possa retomar o controlo depois de se adaptar às novas circunstâncias.
- Nível 5, em que a automatização é total, não sendo necessário qualquer tipo de intervenção humana.

A condução requer diversas funções, incluindo localização, perceção, planeamento, controlo e gestão. A aquisição de informações é um pré-requisito para a localização e perceção. Se todas estas funções, incluindo a aquisição de informações, estiverem disponíveis num veículo, este pode ser definitivamente considerado um VA. Se algum VA precisa de comunicar com outros veículos ou infraestruturas para recolher informações ou calcular as suas manobras, é denominado veículo autónomo conectado (VAC). Portanto, a tecnologia VAC é complementar ou tem um efeito sinérgico na implementação dos VA até certo ponto, embora a conectividade não seja uma característica obrigatória dos VAs (Faisal et al., 2019).

Existem várias tecnologias usadas em veículos autónomos. No Quadro 2.1 apresentam-se as tecnologias e a função de cada uma.

Quadro 2.1 - Tecnologia nos veículos autônomos e respetiva função (Martínez-Díaz et al., 2019)

Tecnologia	Função
Sensor ultrassons	Deteção de objetos muito perto
Sensor capacitivo	Sensor de obstáculos de curto alcance
Sensor infravermelhos	Sensor de obstáculos de curto alcance, especialmente em condições de pouca luminosidade.
Radar	Sensor de obstáculos, das suas velocidades a curto/longo alcance
Sonar	Evitar obstáculos súbitos
LiDAR	Sensor de obstáculos preciso de longo alcance; auto-localização, criação de mapa de alta-definição
Visão artificial	Reconhecimento e monitorização de objetos; deteção de cores e tipos de letras; reconhecimento da sinalização; geração de imagens 3D do ambiente à volta do veículo.

2.1.1 Objetivos, benefícios e problemas dos veículos autônomos

Tal como os condutores humanos, existe o objetivo de haver uma sequência de acontecimentos e processos para que a condução seja eficaz:

- **Perceção:**

Capacidade do veículo de perceber o ambiente em redor evitando colisões com outros veículos ou qualquer outro tipo de obstáculo. Para isso são usadas várias das tecnologias referidas acima, tal como o LiDAR, que utiliza lasers para determinar a distância, medindo o tempo que a luz demora a regressar depois

de refletir nos objetos em redor. O RADAR utiliza ondas de rádio da mesma forma que o LiDAR utiliza raios laser.

Para além destes, são utilizadas ainda câmaras de monovisão, utilizadas para reconhecer infraestruturas fixas, marcações e sinalizações (Mv & Jaswal, 2015).

- **Planeamento de trajetória**

O planeamento de movimentos envolve pequenas operações com o objetivo de completar maiores objetivos. Planear o caminho percorrido por um veículo autónomo é uma tarefa complexa que consiste em controlar duas variáveis, a direção e a velocidade. O planeamento de movimentos deverá ser eficiente e suficiente para dirigir o veículo por qualquer tipo de trânsito, estático ou dinâmico. Para além disso deve também ser capaz de controlar a velocidade de acordo com o ambiente.

Conjugando tudo isto, os VAs deverão ser capazes de definir movimentos locais que possam ser executados (Mv & Jaswal, 2015).

- **Navegação**

Os VAs também usam o GPS para localizar o veículo no território. O sistema GPS recebe sinais de satélites em órbita para triangular as coordenadas geográficas. Essas coordenadas são cruzadas com mapas da rede viária para permitir que os veículos identifiquem sua posição nas estradas e naveguem em conformidade.

O GPS é geralmente combinado com sistemas de navegação inercial (INS), que consistem em giroscópios e acelerômetros para calcular continuamente a posição, orientação e velocidade do veículo sem a necessidade de referências externas (Mv & Jaswal, 2015).

- **Comportamento**

Quando as tarefas descritas anteriores são completadas, o veículo tem de agir em conformidade com as mesmas (Mv & Jaswal, 2015). No entanto, há vários desafios que os VAs têm de ultrapassar para o fazer com sucesso:

Barreiras para a implementação dos veículos autónomos

Apesar de trazerem muitos benefícios, a chegada dos veículos autónomos traz também alguns desafios e problemas que terão de ser ultrapassados:

- **Segurança cibernética e privacidade:**

Apesar de se prever um aumento da segurança, existem outras possíveis causas de acidentes que podem vir a surgir como ataques cibernéticos ou algum tipo de falha no sistema (Milakis et al., 2017) ou ainda, os VAs serem usados como ferramenta para atos terroristas (Mv & Jaswal, 2015). Para além disso, os dados eletrónicos podem não ser seguros e serem sujeitos a abusos. O facto de estes veículos estarem a ser localizados constantemente faz com que esta informação possa ser usada para maus propósitos (Mv & Jaswal, 2015).

- **Energia:**

Prevê-se que, no futuro, a eletricidade seja a fonte de energia mais utilizada pelos veículos. Esta evolução traz também os seus próprios problemas. Um dos problemas é a autonomia dos veículos elétricos (Luong et al., 2022) e ainda o problema de falta de estações de carregamento e a falta de capacidade da rede energética de abastecer uma grande quantidade de veículos elétricos (Mouftah et al., 2020).

- **Materiais:**

A questão da mineração de materiais e a reciclagem das baterias utilizadas ainda são um tema crítico a ter em conta (Beaudet et al., 2020).

- **Legais:**

Antes de se poder considerar estradas para veículos autónomos é necessário que esse tipo de sistemas seja considerado e legalizado no código da estrada. Para isso, terá de haver algum tipo de entidade que certifique os sistemas propostos pelos fabricantes para que seja aprovado o seu uso.

- **Tecnologia:**

Ainda existem questões tecnológicas tanto de *software* como *hardware*, mas especialmente de *software* que têm de ser resolvidos antes que os VAs sejam aceites pela sociedade em geral.

- **Desemprego:**

Um dos maiores problemas previstos com a chegada dos veículos autónomos é o desemprego. Quando o sistema de automação estiver desenvolvido, não haverá qualquer necessidade de haver condutores no dia a dia. Deste modo, todos aqueles que ganham a vida como condutores profissionais não o poderão fazer (Mv & Jaswal, 2015), tendo em consideração a espetável redução de custos de um condutor humano para um condutor artificial.

Benefícios dos veículos autónomos

Os veículos autónomos trazem vários benefícios como redução de stress de condutores, mobilidade a não condutores, aumento na segurança, aumento de eficiência e redução da poluição (Mv & Jaswal, 2015):

- **Segurança:**

Segundo a *National Highway Traffic Safety Administration* dos Estados Unidos da América, 90% dos acidentes são causados por erro humano. O que faz com que haja a possibilidade de eliminar 90% dos acidentes que acontecem

atualmente, num cenário em que a totalidade dos veículos envolvidos são autônomos.

- **Aumento de eficiência e redução da poluição:**

A conversão de combustíveis fósseis para outros tipos de energia mais sustentáveis como fonte de energia dos veículos autônomos está fortemente ligada à evolução dos veículos autônomos. Assim, é esperado que o uso de veículos elétricos contribua para limitar o aquecimento global de 1,5-2° C, de acordo com a expectativa dos acordos de Paris (Luong et al., 2022).

- **Mobilidade:**

A chegada dos veículos autônomos traz mobilidade independente para não condutores e, deste modo, reduz a necessidade de motoristas (Litman & Litman, 2013). Para além disso, os veículos autônomos poderão vir a transportar animais e até objetos.

- **Aumento da capacidade das estradas e diminuição de custos:**

A partilha de veículos, o *platooning* ou condução em pelotão, vias mais estreitas, redução de paragens em interseções, reduzindo o congestionamento e os custos de infraestrutura viária poderão vir a diminuir os custos dedicados à mobilidade (Litman & Litman, 2013).

- **Veículos partilhados:**

A chegada dos veículos autônomos poderá facilitar a partilha de veículos, o que pode trazer poupanças de custo (Litman & Litman, 2013). Exemplos de veículos partilhados são serviços de *ridesharing* ou *carsharing*, que fazem com que a necessidade de veículos privados não seja imprescindível em muitos casos.

- **Parqueamento eficiente:**

Os veículos autônomos poderão deixar os passageiros e posteriormente, arrumarem-se a eles próprios (Litman & Litman, 2013) sem haver necessidade de o fazerem junto de onde ao destino do passageiro. Para além disso, não será necessário espaço para a entrada e saída de passageiros à volta dos veículos.

Ainda será possível o estacionamento de veículos, autonomamente, sem haver forma de estes saírem do lugar, visto que os outros veículos autónomos poderão desimpedir a passagem quando necessário.

2.1.2 Evolução e perspectiva de futuro

Nos últimos tempos, a preocupação em relação ao ambiente tem vindo a ter cada vez mais importância. Assim, a sustentabilidade é, atualmente, priorizada até pelos governos de vários países. Deste modo, o uso de veículos privados tem sido posto em causa, surgindo assim os veículos autónomos e a sua partilha como uma possível solução. (Martínez-Díaz et al., 2019)

O fabrico de veículos autónomos é mais caro do que o fabrico de um veículo comum devido à necessidade de *software* e *hardware* necessários para o seu funcionamento. No entanto, o Fórum Internacional de Transportes reportou uma redução de 37,9% de tempo de viagem entre veículos comuns privados e veículos autónomos partilhados em Lisboa, tendo por base uma simulação (Milakis et al., 2017). Isto acontece devido à eficiência que se espera que a condução autónoma traga ao trânsito tanto em ambiente urbano como não urbano. Esta redução de tempo implica uma redução de custo por viagem, visto que quanto mais tempo se está em viagem, mais recursos se gastam.

Para além disso, segundo algumas simulações, prevê-se que, em certas condições, haja uma redução de até 47% de consumo de energia (Milakis et al., 2017).

Prevê-se também que haja um aumento de 23% do uso de transportes não coletivos partilhados, na Europa, como consequência da diminuição dos custos de transporte trazidos pela partilha de veículos autónomos (Martínez-Díaz et al., 2019), entre outras razões. No entanto, é expectável que existam legislações futuramente com o intuito de promover a utilização dos transportes coletivos autónomos em meios urbanos, especialmente.

Assim, pode-se concluir que os veículos autónomos virão a ser o futuro dos transportes, podendo ter uma incidência quase total nas próximas décadas.

2.1.3 Infraestrutura

O suporte da infraestrutura ao aparecimento dos veículos autónomos é essencial para o seu sucesso, apesar de ser um objetivo dos fabricantes de veículos autónomos que estas possam circular sem problemas nas estradas existentes. No entanto, seria vantajoso que os sinais e marcações sejam claros, bem localizados e em boas condições. Para além disso, seria desejável que se evitassem variações drásticas de inclinações de trainéis para facilitar a leitura do ambiente por parte dos veículos (Martínez-Díaz et al., 2019).

Para além de alterações na infraestrutura física, também seria vantajoso melhorar a infraestrutura tecnológica, nomeadamente, no que toca às comunicações sem fios, tratamento de dados, entre outros (Martínez-Díaz et al., 2019).

Existe também a possibilidade de virem a ser construídas estradas inteligentes dedicadas especialmente a veículos autónomos (Martínez-Díaz et al., 2019).

2.2 Questionário

2.2.1 Organização e tratamento de respostas

Para obter uma ideia daquilo que pode ser a perspetiva de futuro em relação à utilização de carros autónomos e as condições em que tal aconteceria, foi feito um questionário respondido por 96 indivíduos de várias faixas etárias.

Este questionário teve como objetivo conhecer, tendo por base uma pequena amostra da população, maioritariamente portuguesa, a receptividade a veículos autónomos e autónomos conectados.

O questionário foi difundido a partir dos contactos pessoais do autor e posteriormente, partilhado pelos mesmos.

Para organizar as repostas dadas, estas serão apresentadas divididas por perguntas, por faixa etária.

A distribuição etária está representada no gráfico circular presente na Figura 2.1:

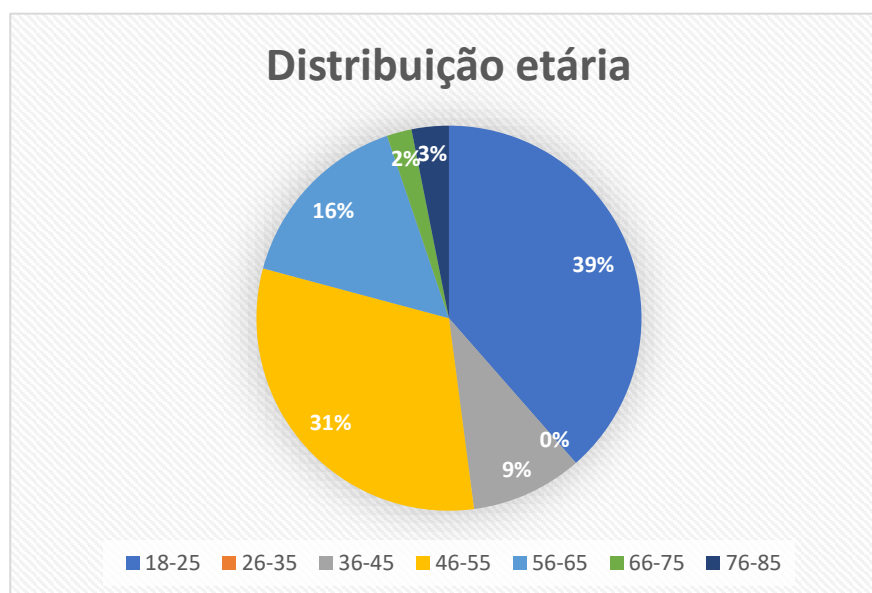


Figura 2.1 - Percentagens de cada faixa etária

2.2.2 Questão 1

As respostas à pergunta "Assumindo que os carros totalmente autónomos serão uma opção segura e acessível, preferia utilizar carros autónomos ou carros comuns? (Assumindo que apenas pode ter um)." são demonstradas na Figura 2.2, divididas por faixas etárias:

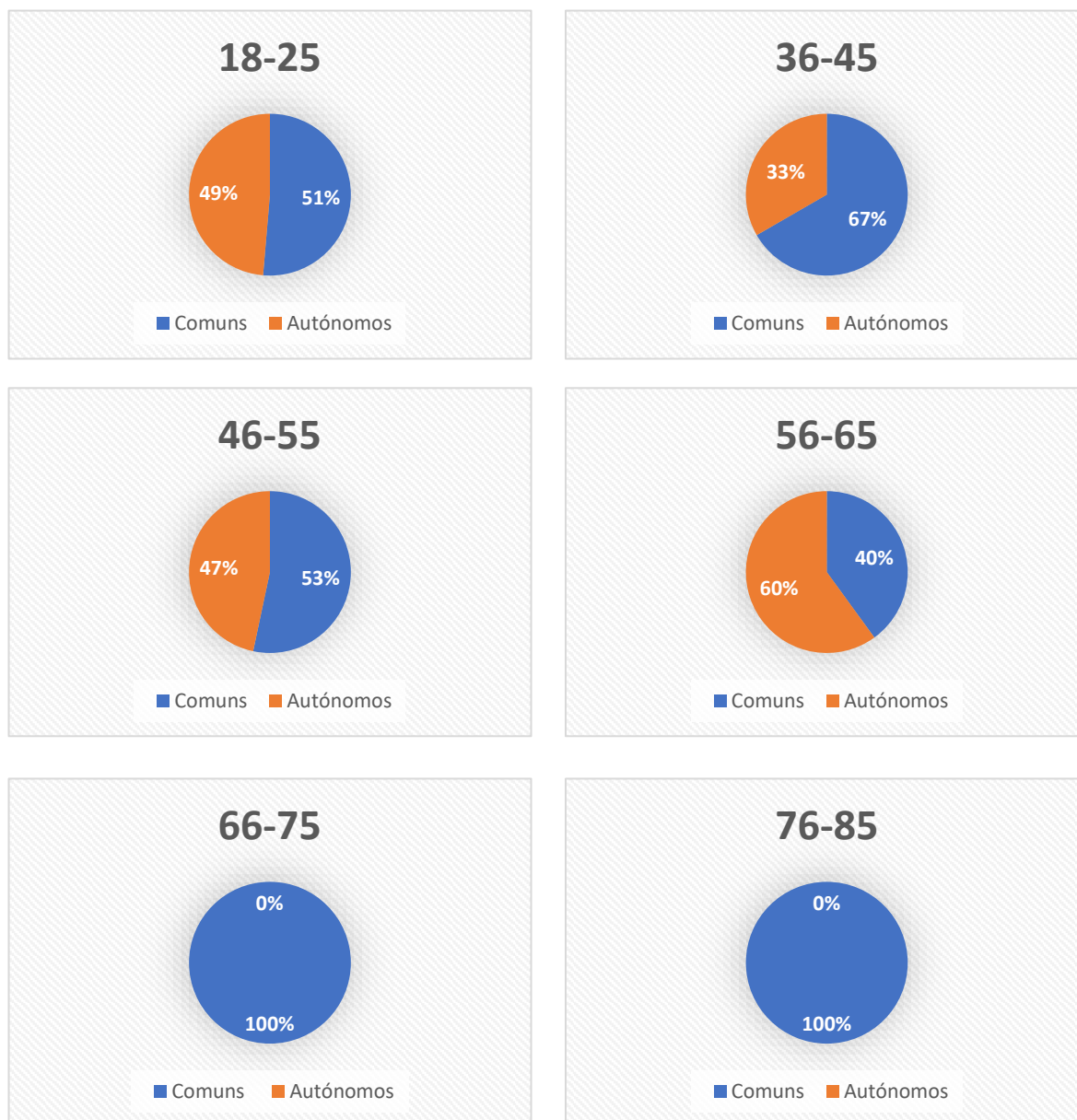


Figura 2.2 - Respostas à 1ª questão

2.2.3 Questão 2

Os resultados relativos à questão "Muitas vezes a chegada dos carros autónomos é associada à partilha dos mesmos, gosta desta opção ou preferia ter o seu próprio veículo?" encontram-se na Figura 2.3, distribuídos por faixa etária:

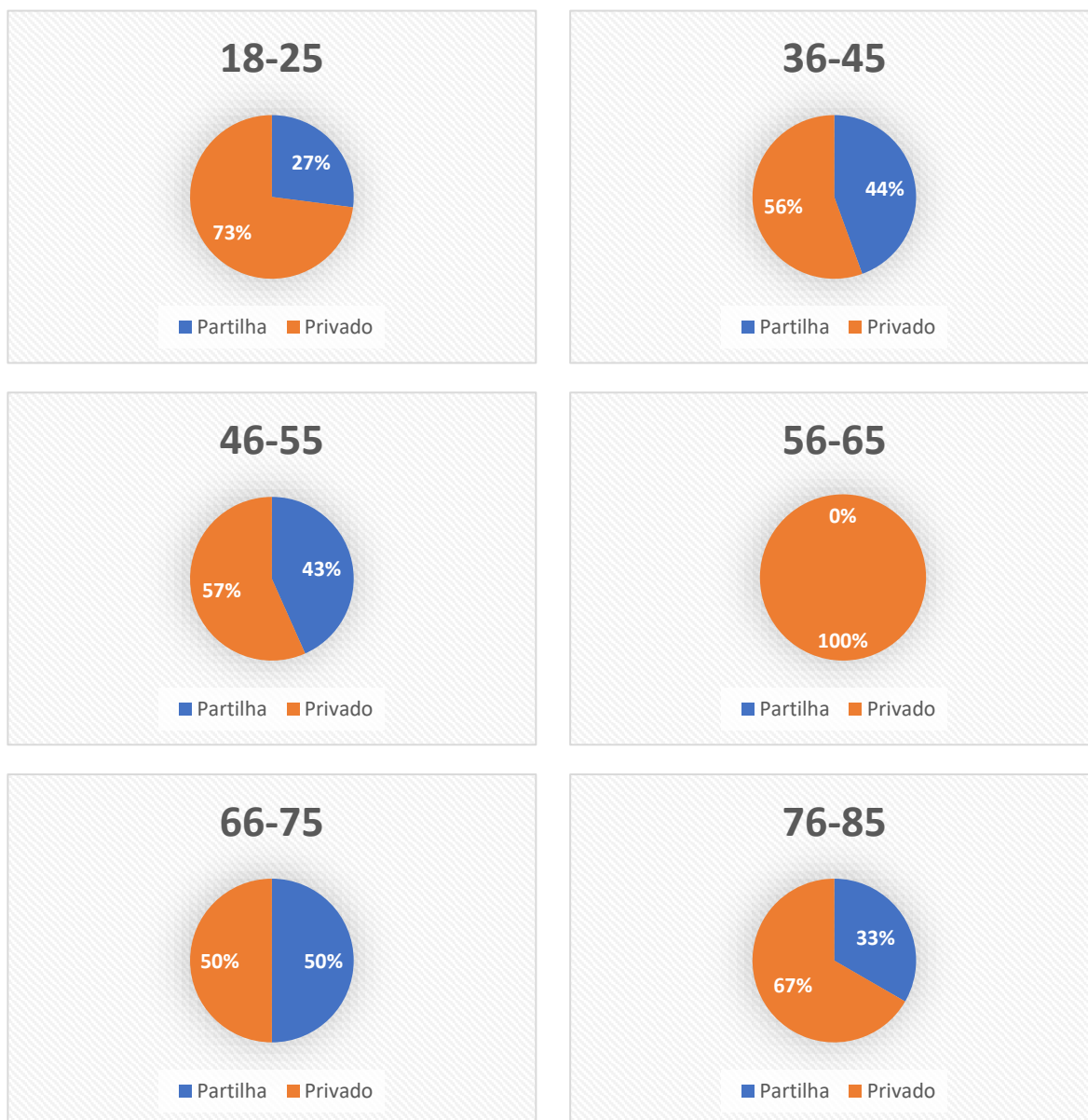


Figura 2.3 - Respostas à 2ª questão

2.2.4 Questão 3

As respostas à questão "Existe também a perspetiva de os carros autónomos serem controlados centralmente por um sistema que poderia alterar o percurso dos veículos numa cidade, por exemplo, para evitar engarrafamentos ou picos de trânsito. Gosta desta opção ou prefere ser autónomo neste tipo de decisões?" são demonstradas na Figura 2.4, divididas por faixas etárias:

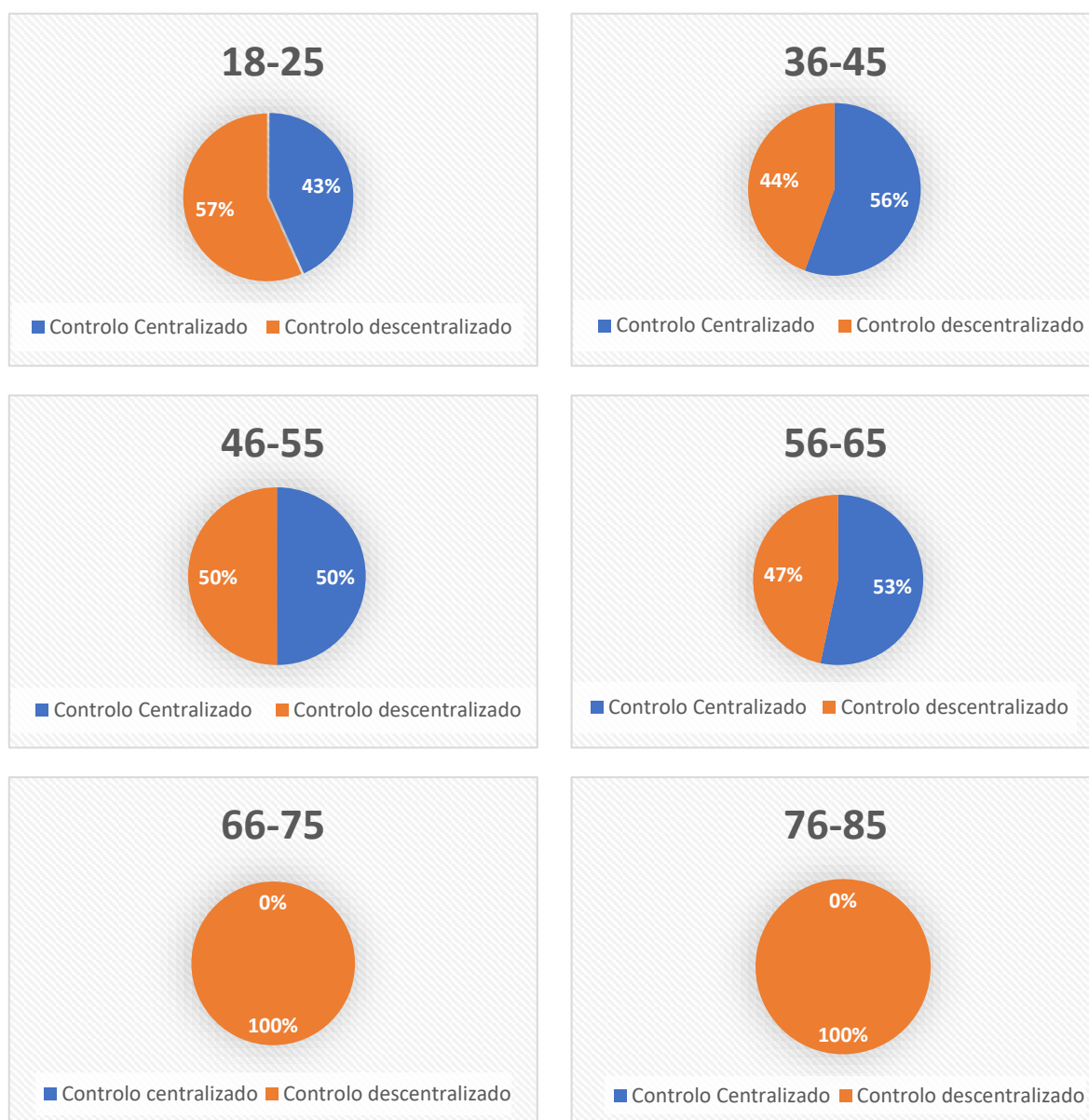


Figura 2.4 - Respostas à 3ª questão

2.2.5 Questão 4

Os resultados relativos à questão "Mesmo que fosse garantida a total segurança num veículo que não tinha a opção de ser controlado manualmente, teria confiança nesse sistema?" encontram-se na Figura 2.5, distribuídos por faixa etária:

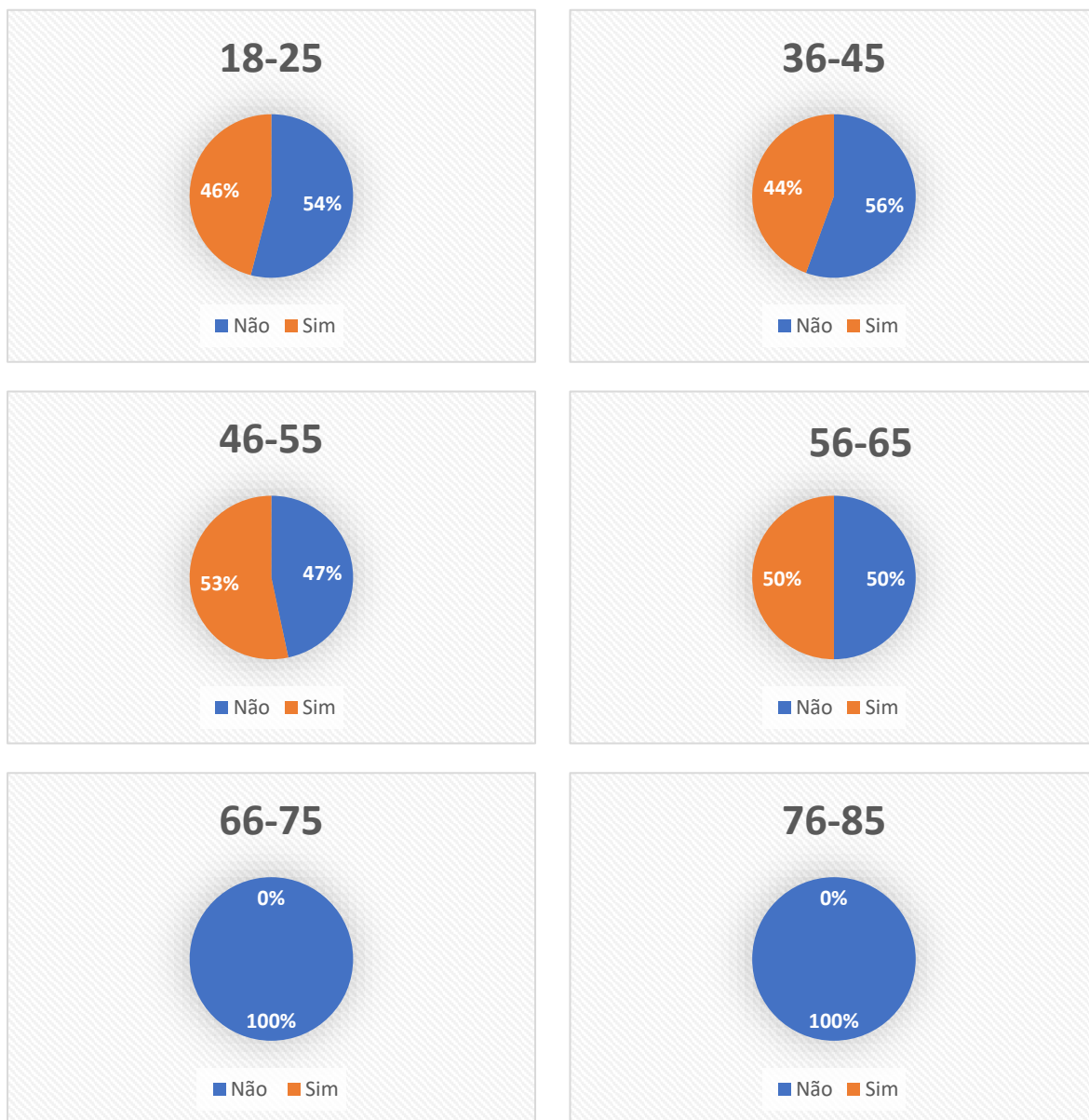


Figura 2.5 - Respostas à 4ª questão

Resultados

Este questionário demonstrou que, apesar de haver alguma dúvida no que toca a este tipo de veículos, cerca de metade das respostas demonstram uma preferência por veículos autónomos, mesmo tendo em conta que estes ainda não entraram no mercado português. No entanto, demonstrou também que cerca de metade dos questionados, desconfiam da tecnologia, o que pode justificar o ponto inicial.

Observou-se também uma preocupação no que toca à privacidade, tanto em relação à propriedade dos veículos como ao seu controlo. Se esta preferência se mantiver, pode vir a ser um obstáculo à existência de veículos autónomos conectados (VAC).

2.3 Revisão sistemática e meta-análise

Este estudo tem como propósito demonstrar a importância e relevância do tema em análise na atual comunidade científica. Para atingir esse objetivo, foi feita uma análise quantitativa utilizando a Plataforma B-On como base, uma biblioteca de conhecimento online que disponibiliza conteúdo científico, seguindo as diretrizes do *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA).

2.3.1 Método

Em primeiro lugar foi feita a pesquisa, na língua inglesa, sem qualquer tipo de filtros com as palavras "*Autonomous vehicles*". Depois, foi feita o mesmo tipo de pesquisa para as palavras "*Autonomous vehicles infrastructure*" e de seguida a mesma pesquisa em artigos onde todas estas palavras se encontravam no título. Por fim, esta mesma pesquisa foi feita considerando apenas artigos publicados em revistas científicas. Destes últimos, foram descartados aqueles que apesar de terem presente todas estas palavras no título, não estão relacionados com o tema tratado neste estudo.

2.3.2 Resultados

De seguida, na Figura 2.6, apresentam-se os resultados da análise quantitativa.

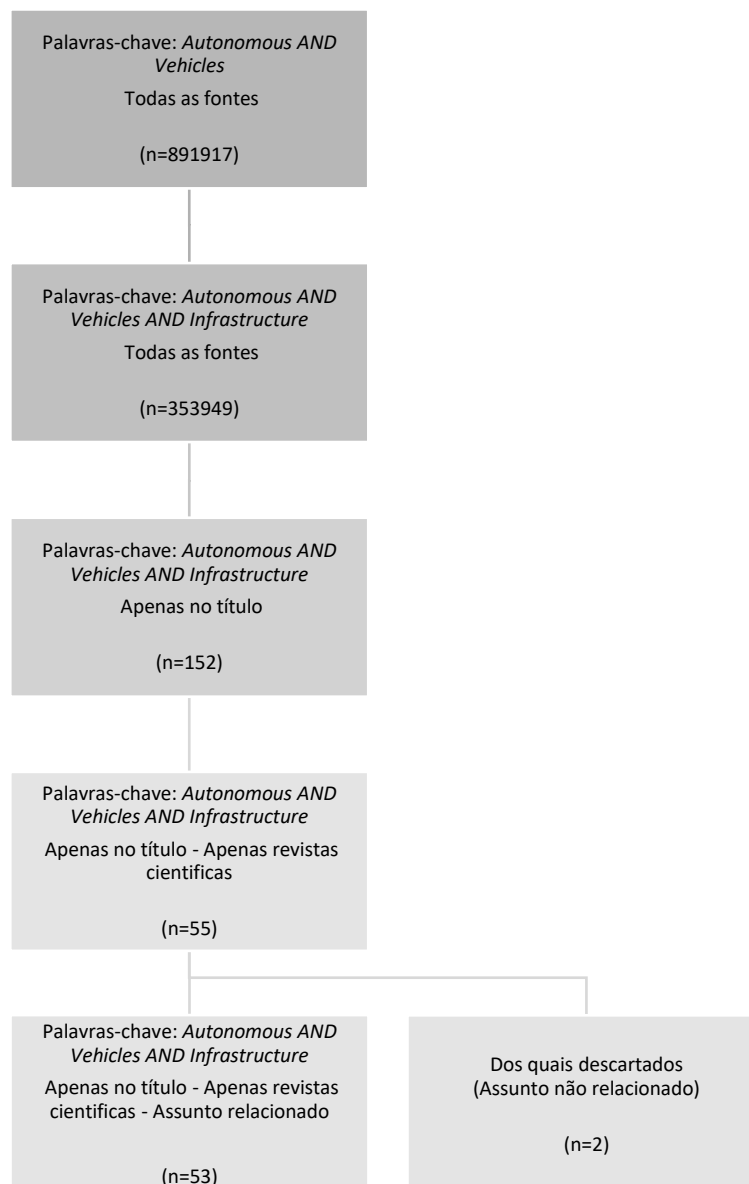


Figura 2.6 - Resultados PRISMA

De seguida, a partir dos últimos 53 artigos, foi realizada uma análise com objetivo de determinar o ano de publicação de cada um e avaliar a evolução do número de publicações por ano, como se pode observar na Figura 2.7.



Figura 2.7 - Evolução do número de artigos publicados por ano

2.3.3 Conclusão

Tendo em conta o número de artigos encontrados relativos ao tema "infraestruturas para veículos autónomos" e a sua distribuição ao longo dos anos, pode-se concluir que este é um assunto relevante. Isto faz com que o estudo dos requisitos de projeto de estradas para veículos autónomos seja extremamente relevante e necessário.

COMPONENTES DE UM PROJETO DE ESTRADAS ATUAL

No presente capítulo será analisada a norma de traçado portuguesa bem como os pressupostos tidos em conta para desenvolver a mesma. Para isso, serão analisadas as vertentes que poderão ser alteradas com a chegada dos carros autónomos. Todo este capítulo tem como base a revisão da norma de traçado (InIR, 2010).

3.1 Tráfego

As características técnicas de cada projeto de uma estrada são selecionadas tendo em conta o nível de serviço pretendido e o volume horário de projeto previsto para o ano de horizonte. O nível de serviço mede as condições de circulação, nomeadamente a densidade de tráfego, a velocidade média e a percentagem de perda de tempo.

A velocidade a que cada condutor deseja circular varia de veículo para veículo. Isto significa que os condutores apenas conseguem circular à velocidade do condutor mais lento à sua frente, a não ser que executem ultrapassagens consecutivas. Se as ultrapassagens não forem possíveis, formam-se pelotões.

O nível de serviço pode ser definido com base na perda máxima de tempo admissível e na velocidade média de tráfego. A percentagem da perda de tempo reflete a mobilidade possível.

O volume de serviço é o número máximo de veículos que podem passar numa determinada secção de uma faixa de rodagem, numa hora. O volume horário de projeto deve ser definido para o ano horizonte.

3.2 Velocidade

A velocidade é um parâmetro fundamental para a escolha dos elementos geométricos do traçado. No entanto, esta depende de inúmeros fatores como a topografia, volumes de tráfego, tipo de veículo, características dos condutores, entre outros.

A velocidade base (VB) é uma velocidade arbitrada na elaboração de um projeto rodoviário.

A velocidade de circulação não impedida (VCI) é a velocidade de circulação de um veículo ligeiro, com densidade de tráfego muito baixa e sem condicionantes nem fatores adversos. Pode-se considerar que um condutor circula à velocidade de circulação não impedida quando menos de 25% dos condutores circulam em fila e os tempos de espaçamento entre o veículo em questão, o que lhe precede e o subsequente são, respetivamente, 6 e 3 segundos.

Num trecho de estrada reto, nas mesmas condições, a velocidade de circulação não impedida designa-se velocidade de circulação livre.

A média e o percentil 85 das velocidades de circulação não impedida correspondem, respetivamente à velocidade média de circulação não impedida e à velocidade não impedida. Em troço reto, correspondem à velocidade média de circulação livre e à velocidade desejada.

Toma-se como representativa a velocidade do tráfego, a velocidade que se admite ser excedida por 15% dos veículos.

3.2.1 Velocidade base

A velocidade base (VB) depende do tipo de estrada da rede nacional, tendo em consideração os condicionamentos topográficos, ambientais, de ordem económica, os objetivos de tráfego

e o nível de serviço. A VB permite seleccionar a maioria das condicionantes geométricas que, conseqüentemente, contribui para uniformizar o traçado. As velocidades base consideradas dispõem-se no Quadro 3.1:

Quadro 3.1 - Velocidades Base

Tipo de Estrada		Velocidade Base (km/h)				
		140	120	100	80	60
Dupla faixa de rodagem	IP	x (a)	x (a)	x	-	-
	IC	x (a)	x (a)	x	x (b)	-
Faixa única, com dois sentidos	IC	-	-	-	x	-
	EN	-	-	-	x	x
	ER	-	-	-	x	x

(a) Só em autoestrada

(b) Deve ser justificado

(c) Prevê-se futura duplicação

A velocidade base é utilizada para determinar o raio mínimo em planta, a inclinação máxima dos trainéis e o perfil transversal tipo e deve ser mantida ao longo da estrada. Quando não é possível manter, a alteração deveria ser gradual.

Com o objetivo de assegurar a comodidade e a segurança do tráfego, a velocidade base não deveria diferir em mais de 10 km/h, em trechos contínuos.

3.2.2 Velocidade de tráfego

Através de uma curva de distribuição cumulativa de velocidades numa secção de estrada, determina-se para cada velocidade a percentagem de veículos que circulam a uma velocidade igual ou inferior à mesma.

A velocidade de tráfego corresponde ao percentil 85, o que se toma como a velocidade de tráfego (VT). Estas velocidades relacionam-se com a velocidade base como se mostra no Quadro 3.2:

Quadro 3.2 - Velocidade de tráfego para cada velocidade base

Velocidade base (VB)	Velocidade de tráfego (VT)
40	50
50	60
60	80
70	90
80	100
90	110
100	120
110	125
120	130
130	135
140	140

A definição de características geométricas de uma estrada conta com ambas as velocidades, dependendo do elemento em questão. Para definir o raio mínimo em planta, a inclinação máxima do trainel e o perfil transversal tipo, é considerada a velocidade base. Para estabelecer as distâncias de visibilidade e o raio mínimo das concordâncias verticais, considera-se a velocidade de tráfego.

3.3 Visibilidade

A visibilidade tem uma elevada importância para a segurança e eficiência da condução.

É importante assegurar a distância de visibilidade, que é a extensão contínua de estrada visível pelo condutor, suficiente para que os condutores controlem a velocidade dos seus veículos, evitando embater num obstáculo inesperado na faixa de rodagem.

São consideradas três tipos de distâncias de visibilidade: paragem, decisão e ultrapassagem.

3.3.1 Distância de visibilidade de paragem

A distância de visibilidade de paragem é a distância mínima necessária para que um condutor possa parar em segurança quando circula a uma determinada velocidade. Esta distância convém ser sempre assegurada quando não é possível haver distâncias maiores.

Esta distância de visibilidade é medida entre os olhos do condutor (1,05 m) e um obstáculo com 15 cm de altura.

A distância de visibilidade de paragem (DP) é determinada através da adição de duas parcelas, uma traduz a distância percorrida durante o tempo de perceção-reação (2 s) e a outra traduz a distância de travagem, que é em função da velocidade de tráfego (VT, em km/h), do coeficiente de atrito longitudinal (f_l) e da inclinação do trainel (+i ou -i em %/100). A expressão [3. 1] da DP é a seguinte:

$$DP = \frac{VT}{1,8} + \frac{VT^2}{254 (f_l \pm i)} \quad [3. 1]$$

Os coeficientes de atrito longitudinal são indicados no Quadro 3.3:

Quadro 3.3 - Coeficientes de atrito longitudinal

Velocidade de tráfego	f_l
50	0,32
60	0,32
80	0,32
90	0,32
100	0,32
110	0,31
120	0,31
130	0,27
140	0,25

3.3.2 Distância de visibilidade de decisão

A distância de visibilidade de decisão é a distância percorrida por um veículo enquanto um condutor tem de tomar uma decisão complexa, quando as informações dadas não são de compreensão imediata. Assim, para que as transições sejam seguras, esta distância tem de ser assegurada em locais onde as expectativas do condutor não são cumpridas e estas são alteradas, como por exemplo, em cruzamentos de nível, áreas de serviço, diminuição do número de vias, entre outros.

A distância de visibilidade de decisão (DD, em m) é dada pela expressão [3. 2]:

$$DD = 3.3 VT \quad [3. 2]$$

Em que VT é a velocidade de tráfego.

3.3.3 Distância de visibilidade de ultrapassagem

Considera-se que a manobra de ultrapassagem tem de ser efetuada sem que um veículo que circule em sentido contrário e seja visto no início da manobra, tenha de reduzir a velocidade a que circula.

A distância de visibilidade de ultrapassagem é a distância de visibilidade necessária para que o condutor de um veículo ultrapasse outro veículo com segurança e comodidade.

Esta distância só é de considerar em estradas com duas vias. Em certos casos, é mais viável economicamente construir zonas de ultrapassagem com três ou quatro vias.

A distância de visibilidade de ultrapassagem tem por base a consideração de quatro distâncias: a distância de manobra inicial, a distância na via da esquerda, a distância de segurança e a distância percorrida pelo veículo que circula na direção contrária (Abdulhafedh, 2020).

A revisão da norma de traçado define a distância de visibilidade de ultrapassagem (DU, em m) através da expressão [3. 3]:

$$DU = 7 VT$$

[3. 3]

Em que VT é a velocidade de tráfego.

3.4 Geometria

3.4.1 Traçado em planta

Generalidades

As principais condicionantes do traçado são a velocidade, as características topográficas e geotécnicas, tal como os custos. Estes fatores são considerados para obter um traçado seguro, económico, cómodo e integrado no meio onde se insere.

Tendo isso em conta, recomenda-se que o traçado em planta garanta a distância de visibilidade de paragem correspondente à velocidade de tráfego. Para além disso, evita-se que o traçado seja monótono.

O traçado em planta refere-se a uma diretriz que consiste na projeção, sobre o plano horizontal do eixo da secção transversal, localizado no centro de faixas de rodagem de estradas de duas vias ou o centro do separador em estradas com dupla faixa de rodagem. No caso de o separador não ter largura constante, consideram-se dois eixos correspondentes aos limites esquerdos de cada faixa de rodagem.

A diretriz será composta por alinhamentos retos, curvas circulares e curvas de transição.

Alinhamentos retos

O limite máximo de comprimento de alinhamentos retos serve para evitar o encadeamento noturno e a monotonia da condução, sendo a extensão máxima de um com inclinação constante $20 V_B$ (m), onde V_B é a velocidade base (km/h).

Já o limite mínimo recomendado resulta de ser necessário, sempre que possível, promover a possibilidade de ultrapassagem segura. Assim, a extensão mínima recomendada é de $7 V_B$.

Para além disso, sugere-se também que se evitem orientações dos alinhamentos retos coincidentes com a direção nascente para evitar o encadeamento provocado pelo sol.

Curvas circulares

Como foi referido anteriormente, deve-se ter em consideração a harmonização com a paisagem e fatores geotécnicos e topográficos. No entanto, aconselha-se, sempre que possível, que o raio das curvas circulares seja o maior possível para facilitar a visibilidade e a perceção do traçado.

Os raios mínimos obtêm-se através da relação de equilíbrio entre a força centrífuga à qual o veículo é sujeito quando percorre uma curva e a força de atrito transversal garantida na interface pneu-pavimento e pela componente do peso do veículo garantida pela sobrelevação.

A partir destas relações pode ser deduzida a expressão [3. 4]:

$$R = \frac{V^2}{127(f_t + Se)} \quad [3. 4]$$

Em que V é a velocidade (km/h), R é o raio da curva (m), Se é a sobrelevação (%/100) e f_t é o coeficiente de atrito transversal, cujos valores se podem encontrar no Quadro 3.4, de seguida:

Quadro 3.4 - Coeficientes de atrito transversal

Velocidade base (km/h)	f_t
40	0,16
50	0,16
60	0,15
70	0,14
80	0,14
90	0,13
100	0,12
110	0,10
120	0,09
130	0,08
140	0,06

Curvas de transição

As curvas de transição têm como objetivo a gradual transição entre dois troços diferentes, tanto troço reto e curva circular como duas curvas circulares de raios diferentes. Isto tem como objetivo assegurar a variação uniforme da aceleração centrífuga entre alinhamentos retos e curvas circulares, permitir a introdução e supressão da sobrelevação e sobrelargura, melhorar a comodidade ótica do traçado e, no caso de curvas de transição de pequeno comprimento, é sugerido que seja possível percorrê-la à VB em menos de 2 segundos.

Homogeneidade do traçado

Para se obter a homogeneidade de um traçado é importante que haja uma relação equilibrada entre curvas circulares sucessivas, tanto por razões económicas como ambientais para além de razões de segurança.

Por sua vez, também é recomendado que o raio das curvas esteja relacionado com o comprimento do alinhamento reto que precede a curva.

Visibilidade em curva

É fundamental que a extensão mínima das curvas circulares seja tal que considere sempre a distância de visibilidade de paragem, tanto em casos em que não existam restrições de visibilidade como quando estes existem.

A expressão da distância mínima H_c (m) de afastamento da obstrução numa curva depende da DP (m) da seguinte forma:

$$H_c = \frac{DP^2}{8R} \quad [3. 5]$$

Em que R é o raio da curva (m).

Extensão mínima das curvas

Aconselha-se que, à velocidade base, as curvas sejam percorridas em pelo menos 2 segundos. No entanto, é recomendado que este mínimo seja excedido. Para ângulos de deflexão, ou desvio, inferiores a 6 graus, a extensão mínima da curva (Em , em m) é dada pela expressão [3. 6]:

$$Em = 33,33 (9,5 - \alpha) \quad [3. 6]$$

Em que α é o ângulo de deflexão (grados).

Para ângulos de deflexão iguais ou superiores a 6 graus, é estabelecida uma extensão mínima de 150 (m). Quando existem curvas de transição, é considerada 50% da extensão das mesmas. Para além disso, tem-se em consideração que quanto maior a distância a que as curvas são visíveis, mais distorcidas parecem. Assim, nestes casos, recomenda-se que o seu desenvolvimento seja aumentado.

3.4.2 Traçado em perfil longitudinal

Generalidades

O traçado em perfil longitudinal é composto por trainéis e por concordâncias verticais. Tem de ter em conta a topografia, o traçado em planta, os custos, a drenagem, o meio ambiente e a distância de visibilidade.

Trainéis

➤ **Inclinação máxima**

Nos trainéis com grandes Inclinações e comprimentos, tem-se em consideração a redução da velocidade. Isto tem como consequência a diminuição do nível de serviço e aumento dos custos de operação. Considera-se também o aumento de distância de travagem em descidas.

As inclinações máximas dos trainéis são apresentadas no Quadro 3.5:

Quadro 3.5 - Inclinações máximas dos trainéis

Velocidade base (km/h)	Inclinação máxima desejável (%)
40	8
60	7
80	6
100	5
120	4 (3 em autoestradas)
140	3

No entanto, no caso de terreno acidentado, as inclinações podem ser excedidas por 2% quando os trainéis têm até 300 (m) de comprimento e 1% até 600 (m) de comprimento.

Para além disso, é recomendável que os trainéis com a inclinação máxima referida na tabela não tenham uma extensão maior que 3 (km), em qualquer caso.

Estas inclinações podem ser excedidas em casos especiais em que se verifiquem terrenos acidentados e os estudos económicos, ambientais, de segurança, de custos de operação, entre outros, indiquem que os custos de um perfil mais suave não sejam benéficos face a estes fatores.

➤ Inclinação mínima

A Inclinação mínima dos trainéis é de 0,5% para assegurar uma eficiente drenagem. Em zonas de curva, a inclinação do trainel deve ser superior à obliquidade, como demonstra a expressão [3. 7]:

$$i - \Delta i \geq 0,5\% \quad [3. 7]$$

Em que i é a inclinação do trainel (%) e Δi é a obliquidade, ou seja, a inclinação longitudinal do bordo exterior da faixa de rodagem em relação ao eixo (%).

➤ **Extensão crítica dos trainéis**

Para além da inclinação, a extensão dos trainéis é também de elevada importância, visto que são estes dois fatores que vão afetar a capacidade de tráfego, nível de serviço e as perdas de tempo. Assim, a extensão crítica dos trainéis está relacionada com a perda de velocidade dos veículos pesados relativamente aos ligeiros. Deste modo, a extensão máxima é aquela que um trainel pode ter sem provocar uma redução de velocidade considerável dos veículos pesados.

O critério utilizado para a determinação da extensão crítica é a redução de 15 km/h dos veículos pesados, assumindo que estes iniciam a subida a uma velocidade de 90 km/h. A partir deste critério e tendo em conta diferentes inclinações, é possível construir o Quadro 3.6, apresentado de seguida:

Quadro 3.6 - Extensão crítica para cada inclinação

Inclinação do trainel	3%	4%	5%	6%	7%	8%
Extensão crítica (m)	420	300	230	180	150	120

Quando esta extensão é excedida, em faixas com apenas uma via, deve-se considerar uma segunda via.

Concordâncias verticais

➤ **Generalidades**

As concordâncias verticais são zonas em que existe uma variação de inclinação entre dois trainéis. Os limites da curvatura em perfil das concordâncias têm como fatores limitantes a visibilidade e comodidade. A utilização de curvas parabólicas faz com que a variação da curvatura seja constante. Para velocidades elevadas, a comodidade é automaticamente assegurada quando a visibilidade também o é visto que as necessidades de visibilidade obrigam a

concordâncias convexas com grandes raios. Para concordâncias côncavas, acontece o contrário.

É recomendável que seja evitada a utilização de concordâncias verticais do mesmo sentido separadas por uma distância curta para evitar efeitos óticos desagradáveis.

Quando a inclinação longitudinal é inferior a 0,5%, que acontecerá na zona centrada no ponto de tangente horizontal das concordâncias verticais, é necessário garantir a eficiente drenagem a partir de uma inclinação mínima normal das bermas.

➤ **Concordâncias convexas**

O raio das concordâncias verticais é condicionado pela necessidade de assegurar a distância de visibilidade de paragem. A partir das distâncias de visibilidade de paragem (DP) indicadas no capítulo 3.3.1, calculam-se os correspondentes raios pela expressão [3. 8]:

$$R_v = \frac{DP^2}{2(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2})^2} = 0,25DP^2 \quad [3. 8]$$

Em que DP é a distância de visibilidade de paragem (m), h1 é a altura ocular (1,05 m) e h2 é a altura do objeto, 0,15 (m) para o cálculo dos raios mínimos normais e 0,60 (m) para o cálculo dos raios mínimos absolutos, sendo que estes últimos apenas podem ser utilizados em estradas com faixas de rodagem unidireccionais. Em zonas de decisão é necessário garantir maiores distâncias de visibilidade, utilizando-se a distância de visibilidade de decisão (DD) que é igual a 3,3 VT.

Em situações em que a VB é inferior a 50 km/h, onde a adoção dos mínimos calculados não se justifica economicamente, podem-se utilizar raios inferiores, mas nunca inferiores a raios calculados através da fórmula $R_v = 0,25 DP^2$.

➤ **Concordâncias côncavas**

Os limites dos raios das concordâncias côncavas são definidos pela necessidade de assegurar a visibilidade noturna com faróis e pela comodidade, pelo que a aceleração vertical não deverá ser excessiva.

Assume-se então uma altura dos faróis de 0,75 m, para se assegurar uma iluminação a uma distância superior que a DP, assumindo um ângulo de 1° entre o raio luminoso de maior pendente e o eixo longitudinal do veículo. Assim, o raio mínimo é calculado pela expressão [3. 9]:

$$R = \frac{DP^2}{1,5 + 0,035 DP} \quad [3. 9]$$

Vias adicionais

Em estradas de faixa única deve-se proporcionar o máximo de zonas de ultrapassagem, criando, tanto em planta como em perfil longitudinal, o maior número de trechos com distância de visibilidade de ultrapassagem possível. Quando existe falta de oportunidades de ultrapassagem deve ser considerado uma diminuição do nível de serviço, quando o volume de tráfego de projeto se aproxima do volume de serviço correspondente à categoria da estrada.

Quando a extensão de um trainel ou em sequências de trainéis e curvas de concordância sempre ascendente ou descendente for superior à extensão crítica, há que considerar vias adicionais de ultrapassagem.

Quando o traçado com duas vias não permitir o número suficiente de zonas de ultrapassagem, pode ser adicionada uma via de tráfego num ou nos dois sentidos.

Os trechos de ultrapassagem têm no mínimo 0,5 km para que seja possível a ultrapassagem de vários veículos a um veículo lento.

➤ Transições

A transição de perfil transversal (entre duas e três ou quatro vias de tráfego) é projetada de maneira a garantir uma operação segura e eficiente. O comprimento do bisel (B, em m) de supressão de via adicional calcula-se a partir da expressão [3. 10]:

$$B = 0,6 l VB \quad [3. 10]$$

Em que l é a largura (m) e VB é a velocidade base (km/h).

O comprimento do bisel de introdução tem de comprimento entre metade e dois terços do bisel de supressão de via.

É imprescindível que as transições entre diferentes larguras de plataforma sejam totalmente perceptíveis pelo condutor, devendo ser assegurada a DD. As transições devem seguir a regra única de rebatimento da esquerda sobre a direita. Para além disso, a mesma solução deve ser utilizada em todas as situações em que existe a eliminação de uma via de tráfego para evitar ambiguidades.

➤ Vias adicionais em rampa

A existência de trainéis com grande extensão implica a redução de velocidade dos veículos pesados e, conseqüentemente, os veículos que os seguem. A necessidade de construir uma via adicional para veículos lentos é tanto maior quanto maior a necessidade de manter os níveis de serviço. Quando se justificar, estas deverão ser feitas em trainéis com uma extensão superior à crítica e quando a inclinação dos mesmos é maior que 4%, visto que os benefícios de o fazer em trainéis com inclinações menores são mínimos.

A extensão mínima das vias adicionais é de 500 m, excluindo as transições. Quando a extensão é menor do que a referida, os condutores tornam-se impacientes por não terem a oportunidade de aproveitar estas vias para executar a ultrapassagem.

No perfil longitudinal, convém ser considerada uma extensão de transição final Lt (em m), para que seja garantida a distância de visibilidade na zona de convergência. Estas distâncias dependem da velocidade base e estão dispostas no Quadro 3.7:

Quadro 3.7 - Extensão de transição final

Velocidade base (km/h)	60	80	100	120	140
Extensão (Lt) (m)	140	230	300	380	460

➤ **Vias adicionais em declive**

Em zonas em que o declive é acentuado, as velocidades dos veículos pesados podem baixar até 20 km/h, pelo que o efeito na capacidade é o mesmo que numa rampa, o que quer dizer que nestes casos também se considera adaptar vias para veículos lentos.

3.4.3 Perfil transversal

Na configuração do perfil transversal é tido em conta a capacidade, os fatores económicos, a proteção da natureza e os terrenos circundantes. A separação entre os veículos motorizados, bicicletas e peões é de elevada importância quando a velocidade de circulação dos veículos motorizados é superior a 30 km/h.

Os principais elementos do perfil transversal são a faixa de rodagem, as bermas, o separador, as valetas e os taludes.

Uma importante característica do perfil transversal é a largura das vias de tráfego que é definida de acordo com a largura dos veículos e a zona livre.

Faixa de rodagem

➤ **Largura das vias**

A largura da faixa de rodagem é composta pela soma da largura das vias.

Em estradas nacionais com duas vias, a largura mínima considera-se ser de 3,5 m, ou 3,0 (m) para volumes de tráfego de projeto inferiores a 300 veículos por hora e velocidade base inferior a 80 km/h. No entanto, adotam-se vias com 3,75 (m) de largura para assegurar o necessário afastamento entre veículos pesados, em estradas com duas vias, classificadas como IP e IC e com características de via *expresso*.

Nas estradas com duas faixas de rodagem, a largura das vias deve ser 3,75 (m) e 3,5 (m) para velocidades superiores ou iguais a 100 km/h e inferiores a 100km/h, respetivamente.

A largura das vias adicionais deve ser igual à largura da via de tráfego normal.

➤ **Sobrelargura nas curvas**

Ao descreverem uma curva, os veículos ocupam uma maior largura de faixa de rodagem. Este aumento depende do raio da curva e do comprimento e distância entre eixos do veículo. Para veículos pesados, o aumento de largura é significativo, especialmente articulados ou com reboques.

A sobrelargura (SL, em m) para estradas com duas vias é calculada a partir da expressão [3. 11]:

$$SL = 80/R \qquad [3. 11]$$

Em que R é o raio da curva (m).

A sobrelargura é introduzida no intradorso da curva, ao longo das curvas de transição. Em curvas com raio superior a 200 m, não é necessário considerar uma sobrelargura.

➤ **Sobrelevação**

A sobrelevação das curvas contribui, como já referido, para a segurança e comodidade de circulação, ao fazer com que a força centrífuga seja compensada pela força da gravidade. Para além disso, favorece a precessão das curvas, logo, a orientação ótica.

A sobrelevação deve ser definida de acordo com a velocidade não impedida compatível com o raio da curva.

A linha de maior inclinação no pavimento, resultante da inclinação do tranel com a da sobrelevação, não é aconselhável ultrapassar 10%. Caso este valor seja ultrapassado, não se deve diminuir o valor da sobrelevação, mas sim a inclinação do tranel, ou alterar o traçado em planta. No Quadro 3.8 encontram-se os valores de sobrelevação relativos a diferentes raios de curva:

Quadro 3.8 - Sobrelevação em relação ao raio

Estradas de faixa única, com dois sentidos		Estradas com dupla faixa de rodagem	
Raio (m)	Sobrelevação (%)	Raio (m)	Sobrelevação (%)
<525	7,0	<1100	7,0
525	6,5	1100	6,5
600	6,0	1300	6,0
700	5,5	1500	5,5
850	5,0	1750	5,0
1000	4,5	2000	4,5
1200	4,0	2250	4,0
1400	3,5	2600	3,5
1600	3,0	3000	3,0
$1900 \leq R \leq 2500$	2,5	$3500 \leq R \leq 5000$	2,5
≥ 2500	-	≥ 5000	-

As vias de circulação adicionais, bermas pavimentadas, vias de aceleração e desaceleração e de entrecruzamento mantêm esta inclinação.

➤ Transições de sobrelevação

Como já referido, a sobrelevação é efetuada ao longo da curva de transição. O eixo de rotação depende do tipo de inclinação transversal em alinhamento reto, da sobrelevação em curva e do local. A posição do eixo de rotação influencia o valor de obliquidade da transição da sobrelevação (Δi). A transição da rotação permitirá a cómoda variação da aceleração transversal não compensada pela sobrelevação e disponibilizar um enquadramento ótico adequado.

O valor mínimo da obliquidade da transição da sobrelevação (Δi) em zonas de transição da sobrelevação em que a inclinação transversal da estrada (i_t) é menor que 2,5%, dá-se pela expressão [3. 12]:

$$\Delta i \text{ mín (\%)} = 0,1 * a \quad [3. 12]$$

Em que a é a distância entre o eixo de rotação ao bordo da faixa de rodagem.

Por razões óticas e dinâmicas, é fixado um valor máximo para Δi , que depende da velocidade do tráfego, como se pode observar no Quadro 3.9:

Quadro 3.9 - Obliquidade da transição da sobrelevação em relação à velocidade de tráfego

Velocidade do tráfego (km/h)	< 40	40 < VT ≤ 80	> 80
Δi máx. (%)	1,5	1,0	0,8

Quando os valores mínimos e máximos se contradizem, o valor a adotar é o mínimo, uma vez que deve ser garantida a drenagem e assim promover a segurança.

Bermas

As bermas servem para permitir a passagem de veículos de emergência, refúgio para veículos parados, como suporte lateral do pavimento da faixa de rodagem e para os veículos evitarem

acidentes iminentes. Para além disso, aumentam a capacidade de tráfego. Porém, é recomendável que haja uma diferença entre a faixa de rodagem e a berma, tendo uma cor e textura diferente, para que estas não sejam usadas para circulação de veículos. Para além disso, considera-se uma zona não pavimentada e uma ligação entre a berma e o talude. A largura das bermas encontra-se no Quadro 3.10. As bermas devem-se manter constantes ao longo de uma estrada, mesmo quando existem faixas adicionais.

Quadro 3.10 - Largura das bermas pavimentadas

Tipo de estrada		Velocidade base (km/h)	Largura das vias (m)	Bermas pavimentadas	
				Esquerda (m)	Direita (m)
Dupla faixa de rodagem		≥ 100	3,75	1,00	3,00
		< 100	3,50	1,00	3,00
Faixa única	Via expresso	≥ 80	3,75	2,50	
	EN	≥ 80	3,50	2,50 (a)	
	ER	< 80	3,00 (b)	1,50	

3.5 Conforto e segurança

Tendo em conta que o conforto e segurança serão um fator que será de extrema importância na era dos veículos autónomos, considerou-se imperativa a compilação dos componentes de projeto de estradas que as afetam diretamente.

3.5.1 Homogeneidade

Tal como já referido, de modo a conseguir-se a homogeneidade de um traçado, é importante que haja uma relação equilibrada entre curvas circulares sucessivas, tanto por razões económicas como ambientais, para além de razões de segurança. Para além disso, não se aconselha que a velocidade base difira em mais de 10 km/h, em trechos contínuos.

Por sua vez, também é necessário que o raio das curvas esteja relacionado com o comprimento do alinhamento reto que precede a curva.

3.5.2 Comodidade física

Recomenda-se que a velocidade base não defira, em trechos contínuos, em mais de 10 km/h e que as velocidades não impedidas mais de 20 km/h para evitar acelerações constantes.

Para além de se assegurar a segurança em curvas em planta e concordâncias verticais, há que garantir a cómoda variação de aceleração e também a aceleração máxima.

3.5.3 Comodidade ótica

Para além de se garantir a segurança, garantindo as distâncias de visibilidade já abordadas, existem outros fatores óticos a considerar para que se garanta a comodidade.

O limite máximo de comprimento de alinhamentos retos serve para evitar o encadeamento noturno e a monotonia da condução.

Para além disso, sugere-se também que se evitem orientações dos alinhamentos retos coincidentes com a direção nascente para evitar o encadeamento provocado pelo sol.

Os limites dos raios das concordâncias côncavas são limitados pela necessidade de assegurar a visibilidade noturna com faróis.

COMPONENTES DE UM PROJETO DE ESTRADAS PARA VEÍCULOS AUTÓNOMOS

No presente capítulo, serão abordados os vários parâmetros considerados para o projeto de estradas atuais e as diferenças para os parâmetros que podem vir a ser considerados quando as estradas forem dimensionadas tendo em conta a presença de veículos autónomos.

Existem várias hipóteses no que toca à existência e controlo dos veículos: na primeira hipótese (A), existem tanto veículos autónomos como veículos comuns, totalmente integrados. Na segunda (B), existem também ambos os tipos de veículos, mas existem vias destinadas a cada tipo de veículo. Na terceira (C) e quarta (D) hipóteses, considera-se apenas a existência de veículos autónomos a circular nas estradas, sendo que, na última, os veículos estão conectados tanto entre si, como à infraestrutura.

Este capítulo abordará apenas as situações em que apenas existam veículos autónomos, tanto em estradas como em vias destinadas aos mesmos, salvo alguns comentários que se considerem pertinentes. Existe ainda a diferença entre veículos autónomos (VAs) e veículos autónomos conectados (VACs). Ambos serão abordados quando se justificar, pelo contrário, quando não se justificar esta distinção, ao referir VAs também se incluem os VACs.

4.1 O tráfego dos veículos autónomos

Com a chegada de VAs e VACs é previsível que as condições de tráfego nas estradas sejam otimizadas. Foram feitos vários estudos com o objetivo de prever este aumento de capacidade de tráfego que, no geral, demonstram potenciais impactos que poderão aumentar a eficiência do sistema de tráfego (Al-Turki et al., 2021). Comparando com um cenário em que apenas existem VCs, (veículos comuns), haverá um aumento de 80% na capacidade de tráfego das estradas. Ainda, utilizando o modelo *symmetric two-lane celular automaton* (STCA), concluiu-se que o volume de tráfego pode aumentar de 2000 veículos por hora para 3070 veículos por hora (Maurer et al., 2015).

Para além disso, comparando o tráfego de VAs com VACs que utilizam a tecnologia *cooperative adaptive cruise control* (CACC), com base na escolha adequada do comprimento máximo do pelotão e do espaçamento desejado entre veículos, haverá um aumento da capacidade de tráfego de quase 39%. Numa estrada com várias vias, os VACs aumentarão a capacidade de tráfego por 250%, comparando com VCs (Altintas & Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2018). Um pelotão é uma formação de veículos que circulam na mesma direção e sentido, com pouco espaçamento entre eles.

Ao longo deste capítulo poderão ser justificadas as razões para que este aumento se dê.

4.2 A velocidade dos veículos autónomos

Para abordar o tema da velocidade dos carros autónomos serão considerados apenas as últimas três hipóteses, B, C e D, no que toca à existência e controlo dos veículos visto que apenas se devem considerar alterações no dimensionamento de estradas, ou partes das mesmas, quando estas forem utilizadas apenas por veículos autónomos.

Tendo isso em conta, pode-se assumir que os veículos autónomos circularão, no máximo, à velocidade limite legal (Huggins & Austroads Sydney., 2017). Isto quer dizer que os limites de

velocidade poderão ser aumentados, como será demonstrado mais à frente, porque os veículos autônomos podem circular a uma velocidade mais elevada mantendo o nível de segurança em relação aos veículos comuns. Assim, a velocidade limite legal pode ser aumentada sem prejudicar o nível de segurança. Contudo, em estradas em que existem tanto VAs como VCs, os limites legais poderiam ser distintos para cada tipo de veículo.

Atualmente, nos veículos comuns, quem escolhe a velocidade de circulação, são os condutores, tendo em consideração vários fatores tais como legais: psicológicos, o restante tráfego, entre outros. Numa condução autônoma, quem decidirá a velocidade de circulação imediata é o veículo, mas há que colocar várias hipóteses no que toca ao nível de controlo que o ocupante tem sobre essa decisão.

A primeira é a hipótese de o passageiro poder decidir a velocidade ideal para o trajeto, ou até níveis de urgência ou comodidade desejadas e, tendo isso em conta, o veículo ajustará a sua condução e velocidade. Outra hipótese é o veículo controlar por completo, tendo em conta as condições do ambiente em redor, mas sem ter em consideração os desejos dos passageiros. Por último, a hipótese em que os veículos autônomos são conectados e, deste modo, circulariam todos em função uns dos outros e dos parâmetros previamente definidos.

Todas estas hipóteses trarão vantagens e desvantagens. A primeira hipótese terá a vantagem de haver mais liberdade individual para escolher a velocidade a que cada veículo se desloca, no entanto, isto poderá fazer com que a fluidez de tráfego seja afetada, diminuindo substancialmente o volume de serviço.

Na segunda hipótese, o passageiro perde a liberdade de decidir a que velocidade se quer deslocar e possivelmente deslocar-se-á com desconforto, tanto por viajar mais rapidamente ou até lentamente do que pensa ser satisfatório. No entanto, e contrariamente à primeira hipótese, a fluidez de tráfego poderá ser otimizada.

Na última hipótese, considerando um sistema de controlo centralizado, tanto como as possíveis vantagens como desvantagens da segunda hipótese serão ainda mais acentuadas.

4.3 A visibilidade dos veículos autónomos

A visibilidade dos veículos autónomos traduz a forma como o *software* do veículo interpreta a informação recebida pelos vários sensores. Desta forma, é espectável que essa interpretação seja mais eficiente do que aquela feita pelos humanos.

Neste subcapítulo, serão estudadas as diferenças entre VAs e VCs, no que toca aos vários tipos de visibilidade a ter em conta num projeto de estradas, já abordados no subcapítulo 3.3.

4.3.1 Distância de visibilidade de paragem dos veículos autónomos

Tal como foi referido anteriormente, a distância de visibilidade de paragem (DP) é a soma da distância percorrida durante o tempo de perceção-reação e a distância de travagem, onde é assumido um tempo de reação humana de 2,0 segundos.

No entanto, os veículos autónomos conseguem reagir rapidamente, em 0,2 segundos, depois da deteção de um obstáculo (Othman, 2021), o que faz com que o tempo de reação seja reduzido 10 vezes, tal como a distância percorrida neste tempo. Este valor não inclui margens de segurança que, sendo adicionadas, podem vir a alterar os resultados apresentados à frente. Para manter a coerência, a parcela que traduz a distância de travagem, mantém-se.

Assim, a expressão que traduz a distância de visibilidade de paragem de veículos autónomos (DPva) pode ser a seguinte:

$$DP_{av} = \frac{VT}{18} + \frac{VT^2}{254 * (f_l \pm i)} \quad [4. 1]$$

Em que VT é a velocidade de tráfego (km/h), f_l é o coeficiente de atrito longitudinal e i a inclinação do trainel (%). Os valores de DP e DPva para um trainel em patamar podem ser observados no Quadro 4.1, bem como a redução, em percentagem, entre o valor de DP atual e o proposto. Esta redução calcula-se subtraindo o valor de DPva ao valor de DP, dividindo esse

resultado pelo DP e multiplicando por 100. Daqui para a frente as reduções em percentagem serão calculadas da mesma forma.

Quadro 4.1 - Redução da distância de visibilidade de paragem - VAs

VT (km/h)	DP (m)	DPva (m)	Redução
50	60	35	43%
60	80	50	39%
70	100	65	35%
80	120	85	32%
90	150	105	30%
100	180	130	28%
110	220	160	26%
120	250	190	24%
130	320	255	20%
140	390	315	18%

Os veículos autónomos conectados (VAC) têm ainda a vantagem de, estando a partilhar informações com os veículos na mesma zona, podem até não ter a necessidade de processar a informação recebida através dos sensores, por exemplo, se um obstáculo for reportado por outro veículo que já se tenha apercebido do mesmo.

Para além disso, os VACs poderão vir a ter comunicação veículo-infraestrutura, o que faz com que sensores instalados nas vias reportem possíveis obstáculos aos veículos que, ao passar na zona do obstáculo já tendo essa informação, podem atuar em conformidade. Nesta hipótese, o tempo de perceção-reação será nulo.

Assim, a distância de visibilidade de paragem será apenas a distância de paragem. Assim a diferença pode ser observada no Quadro 4.2:

Quadro 4.2 - Redução da distância de visibilidade de paragem - VACs

VT (km/h)	DP (m)	DPvac (m)	Redução
50	60	31	49%
60	80	44	45%
70	100	60	40%
80	120	79	34%
90	150	100	34%
100	180	123	32%
110	220	154	30%
120	250	183	27%
130	320	246	23%
140	390	309	21%

4.3.2 Distância de visibilidade de decisão dos veículos autónomos

A distância de visibilidade de decisão (DD) é a distância percorrida por um veículo no tempo em que processada uma informação complexa ou quando as informações dadas pela sinalização não são de rápida compreensão.

Como os carros autónomos não vão necessitar de distâncias maiores para reagir a situações complexas, o tempo de reação será semelhante ao do tempo de reação para distância de visibilidade de paragem. Neste caso, a distância de visibilidade de decisão (DDva) será igual à de

visibilidade de paragem (DPva) em trainéis em patamar (Othman, 2021). No Quadro 4.3 pode-se observar a redução da DDva em redução à DD, tendo em consideração um trainel em patamar.

Quadro 4.3 - Redução da distância de visibilidade de decisão

VT (km/h)	DD (m)	DDva (m)	Redução
50	165	34	80%
60	198	48	76%
70	231	64	72%
80	264	83	68%
90	297	105	65%
100	330	129	61%
110	363	160	56%
120	396	190	52%
130	429	254	41%
140	462	316	32%

4.3.3 Distância de visibilidade de ultrapassagem dos veículos autónomos

Tal como referido, distância de visibilidade de ultrapassagem tem por base a consideração de quatro distâncias: a distância de manobra inicial, a distância na via da esquerda, a distância de segurança e a distância percorrida pelo veículo que circula na direção contrária (Abdulhafedh, 2020).

Considerando que a distância de manobra inicial inclui uma distância de perceção, esta poderia ser reduzida devido à diminuição deste tempo proporcionada pelos VAs, já referida.

Para além disso os VAs necessitarão de margem de segurança inferior à considerada atualmente para operar, pelo que a distância poderia diminuir. No entanto, com a margem de

segurança diminuída, os ocupantes do veículo provavelmente não se sentiriam confortáveis com o veículo desviar-se de um outro que circula em sentido contrário, a poucos metros do mesmo ou até centímetros.

Dado que a diminuição desta distância não trará grandes alterações ao traçado, não será relevante diminuí-la, aumentando assim a segurança garantida nestas manobras. Assim, conclui-se que a expressão mencionada no capítulo 3.3.3 se mantém.

4.4 Geometria das estradas para veículos autónomos

Tendo em conta as diferenças já detetadas entre VAs, VACs e VCs, é expectável que isso se traduza também em diferenças no que toca à geometria das estradas para VAs ou VACs e para VCs.

Neste subcapítulo foi considerado que as características dos veículos que não são diretamente alteradas com a mudança entre VAs e VCs se mantêm, como por exemplo a capacidade de travagem e o atrito pavimento-pneu.

4.4.1 Traçado em planta

Alinhamentos retos

A limitação da extensão de alinhamentos retos tem como função evitar a monotonia, o enca-deamento noturno e a dificuldade e na avaliação de distâncias.

No entanto, os fatores referidos não se aplicam a carros autónomos, ou seja, teoricamente um carro autónomo não teria problemas em circular num alinhamento reto infinito. Deste modo, as restrições devem-se a outros fatores como a topografia, integração paisagística, entre outros. No entanto, existe um limite inferior, imposto pela necessidade de facilitar a ultrapassa-gem, em estradas com duas vias. O valor atual é de 7VB (m), tal como referido anteriormente

esta distância poderia ser reduzida por ser diminuída a margem de segurança, no entanto, por questões de conforto, não será aconselhado.

Curvas circulares

➤ Raios mínimos absolutos

Como os raios mínimos absolutos dependem apenas do equilíbrio de forças quando um veículo descreve uma curva, não há razão para que estes sejam alterados para veículos autônomos.

➤ Raios mínimos normais

Como os raios mínimos normais têm como objetivo assegurar a segurança e a comodidade, assegurando uma força centrífuga de 50% do valor máximo admitido, também não existe razão para estes serem alterados.

Curvas de transição

No que toca à necessidade da existência de curvas de transição, estas serão à mesma necessárias para garantir a introdução e supressão da sobrelevação e sobrelargura, pelo que não se prevê nenhum tipo de alteração. Para além disso, as curvas de transição são imprescindíveis para garantir o conforto dos ocupantes entre o alinhamento reto e a curva circular.

Visibilidade em curva

Tal como referido anteriormente, a distância de visibilidade de paragem deve ser assegurada nos alinhamentos curvos, incluindo casos em que existe uma obstrução lateral.

Tal como referido, a expressão da distância mínima (H_c , em m) de afastamento da obstrução

numa curva depende da DP da seguinte forma:

$$Hc = \frac{DP^2}{8R} \quad [3. 5]$$

Em que R é o raio da curva (m).

Tendo como exemplo uma curva em patamar e tendo em conta também os valores de DP, DPva e DPvac referidos no capítulo 4.3.1, observa-se uma redução considerável do valor de Hc para cada valor de R, alterando-se apenas com a velocidade, da qual dependem a DP, a DPva e a DPvac. Assim, a redução dos valores de Hc para cada VT, de veículos comuns para veículos autónomos e autónomos conectados, em percentagem apresentam-se no Quadro 4.4:

Quadro 4.4 - Redução de Hc

Vt (km/h)	Hc (m)	Hc _{va} (m)	Hc _{vac} (m)	Redução (va)	Redução (vac)
50	9	3	2	66%	74%
60	16	6	5	61%	69%
70	25	11	9	58%	64%
80	36	18	16	50%	57%
90	56	28	25	51%	56%
100	81	42	38	48%	53%
110	121	64	59	47%	51%
120	156	90	84	42%	46%
130	256	163	152	36%	41%
140	380	248	238	35%	37%

Na Figura 4.1 compara-se a distância à obstrução lateral para as três situações de distância de visibilidade de paragem (DP, DPva e DPvac). É possível observar que a distância à obstrução diminui substancialmente com a distância de visibilidade de paragem, isto é, para veículos autónomos conectados é possível ter uma curva mais próxima do obstáculo sem comprometer a segurança.

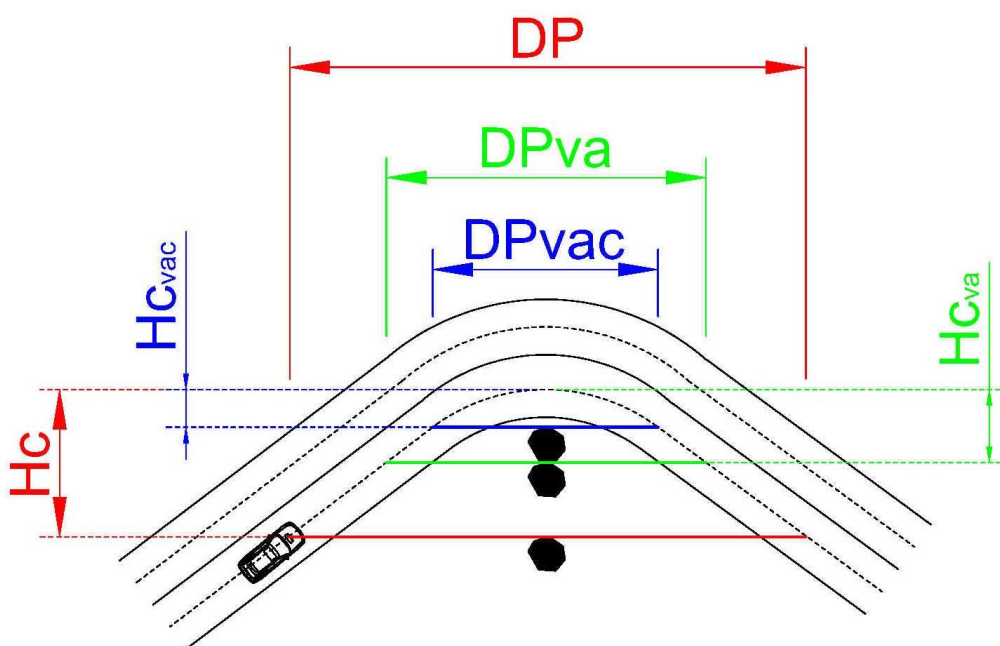


Figura 4.1 - Diferença de Hc entre VCs, VAs e VACs

Extensão mínima das curvas

Tendo em conta que a alteração desta recomendação não iria promover alterações substanciais ao traçado nem aos custos inerentes e, possivelmente, reduziria o conforto dos ocupantes, não existe razão para que seja alterada.

4.4.2 Traçado em perfil longitudinal

Trainéis

➤ Inclinação máxima e mínima

Como já referido, os limites das inclinações máximas e mínimas são, respetivamente, a redução da velocidade dos veículos pesados face à dos ligeiros e a necessidade de escoamento de águas.

Tendo em consideração os critérios que são a base para estas limitações, não existe razão para que sejam alteradas.

➤ Extensão crítica dos trainéis

Tal como para a limitação da inclinação máxima do trainel, a extensão crítica dos trainéis tem por base a perda de velocidade dos veículos pesados relativamente aos ligeiros. Deste modo, mais uma vez, não existem razões para que seja alterada.

Concordâncias verticais

➤ Concordâncias convexas

Tal como referido anteriormente, o raio das curvas convexas depende da distância de visibilidade de paragem (expressão [3. 8]), o que significa que existem diferenças consideráveis no cálculo dos raios mínimos das concordâncias. A diferença de raios mínimos, para cada VB, entre VCs e VAs e VCs e VCAs pode observar-se no Quadro 4.5:

Quadro 4.5 - Redução do raio mínimo de concordâncias convexas

VT (km/h)	DP (m)	DPav (m)	DPvac (m)	R (m)	Rva (m)	Rvac (m)	Redução (va)	Redução (vac)
50	59	34	31	857	281	237	67%	72%
60	78	48	44	1506	567	490	62%	67%
70	99	64	60	2459	1030	909	58%	63%
80	123	83	79	3794	1730	1550	54%	59%
90	150	105	100	5599	2738	2483	51%	56%
100	179	129	123	7973	4134	3784	48%	53%
110	215	160	154	11533	6383	5904	45%	49%
120	250	190	183	15568	8982	8361	42%	46%
130	319	254	246	25384	16085	15182	37%	40%
140	386	316	309	37334	25033	23818	33%	36%

Essa diferença pode ser observada na Figura 4.2, onde se pode ter uma percepção não só da diferença do raio da concordância, mas também da distância de visibilidade de paragem e como este se altera com o raio da concordância. A partir das distâncias A e B, é ainda possível observar as prováveis reduções de custos no que diz respeito a movimentações de terras, visto que, ao considerar um raio mais curto, mantendo o nível de segurança, a distância (B) diminui substancialmente em relação à distância (A), o que aumentará a semelhança entre o terreno e o traçado.

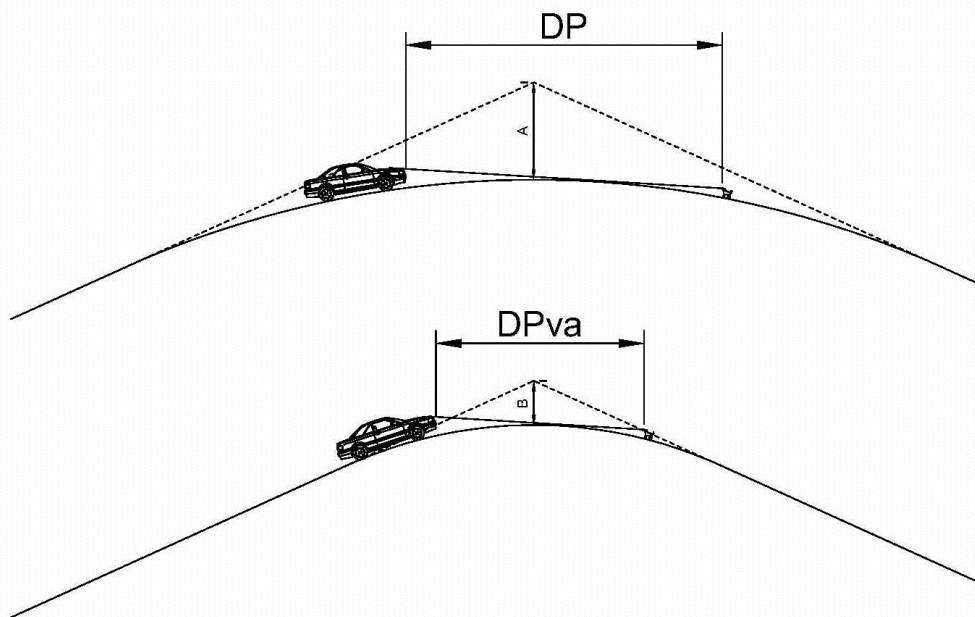


Figura 4.2 - Ilustração da diferença do raio na concordância convexa

➤ **Concordâncias côncavas**

O raio mínimo das concordâncias côncavas tem como condicionante a visibilidade noturna com faróis e pela necessidade de haver uma aceleração vertical reduzida. O valor de R mínimo dá-se pela equação [3. 9].

Tendo em conta a diferença da DP para a DPva e DPvac, a redução do raio mínimo pode ser observada no Quadro 4.6:

Quadro 4.6 - Redução do raio mínimo de concordâncias côncavas

VT (km/h)	DP (m)	DPva (m)	DPvac (m)	R (m)	Rva (m)	Rvac (m)	Redução (va)	Redução (vac)
50	59	34	31	966	421	367	56%	62%
60	78	48	44	1429	716	643	50%	55%
70	99	64	60	1979	1099	1007	44%	49%
80	123	83	79	2611	1569	1457	40%	44%
90	150	105	100	3324	2121	1991	36%	40%
100	179	129	123	4115	2756	2607	33%	37%
110	215	160	154	5116	3600	3433	30%	33%
120	250	190	183	6085	4417	4233	27%	30%
130	319	254	246	8025	6200	5998	23%	25%
140	386	316	309	9939	7963	7744	20%	22%

Essa diferença pode ser observada na Figura 4.3 onde, mais uma vez, pode-se ter uma percepção não só da diferença do raio da concordância, mas também da distância de visibilidade de paragem, desta vez assegurada pela iluminação dos faróis, e como este se altera com o raio da concordância. Para além disso, é possível, tal como para as concordâncias convexas, haver uma maior semelhança entre o traçado e o relevo original, quando se projeta o traçado tendo em conta veículos autónomos, podendo haver uma redução nos movimentos de terras.

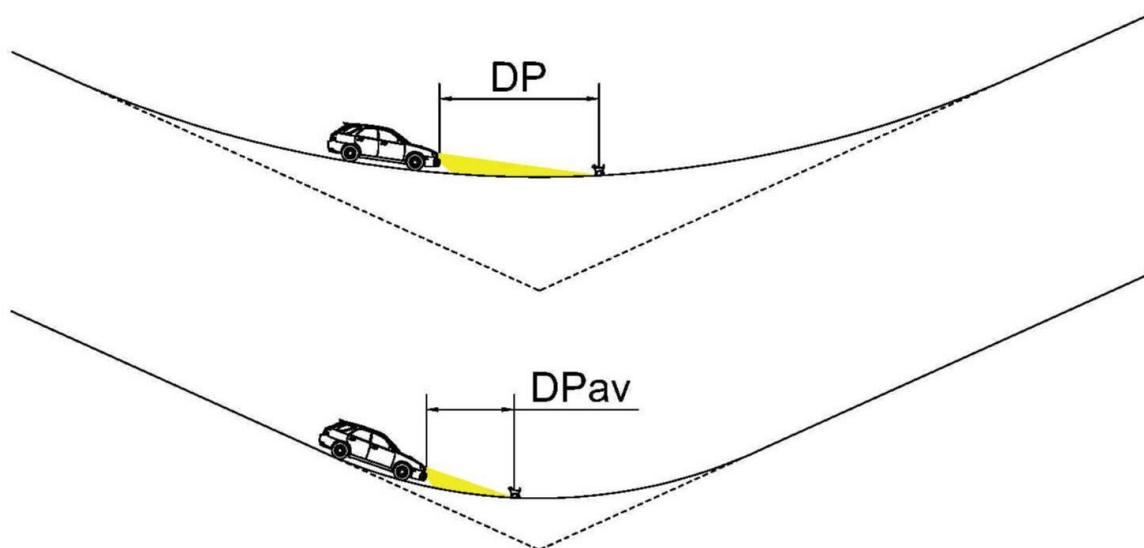


Figura 4.3 - Ilustração da diferença do raio na concordância côncava

Vias adicionais

As vias adicionais têm como objetivo permitir o maior número de ultrapassagens possíveis pelos veículos que circulam com maiores velocidades a veículos que circulam com menores velocidades. Desta forma, há que considerar as hipóteses lançadas no capítulo 4.2 - A velocidade dos veículos autônomos. Se os veículos circularem todos à mesma velocidade, a necessidade de existirem zonas de ultrapassagem deixa de existir. Pelo contrário, se os ocupantes tiverem controlo sobre a velocidade a que o VA circula, as zonas de ultrapassagem continuam a ter relevância, da mesma maneira que têm num contexto de veículos comuns, atualmente.

Nos pontos seguintes, esta segunda hipótese será a considerada.

➤ Transições

Como dito, a transição de perfil transversal é projetada de maneira a garantir uma operação segura e eficiente.

Assim, continua a ser imprescindível que as transições entre diferentes larguras de plataforma sejam totalmente perceptíveis, não pelo condutor, mas pelo veículo, devendo ser assegurada a DDva, já que estas alterações serão uma forma de heterogeneidade local no traçado. Ao ser considerada a DDva e não a DD, pode-se considerar transições mais abruptas e, possivelmente, mais economicamente viáveis.

➤ Vias adicionais em rampa e declive

Como referido anteriormente, existência de trainéis com grande extensão implica a redução de velocidade dos veículos pesados e, conseqüentemente, os veículos que os seguem. Assim, a necessidade de construir uma via adicional para veículos autónomos lentos mantém-se da mesma forma que se considera para VCs.

4.4.3 Perfil transversal

Quando se aborda a questão do perfil transversal, é preciso antes colocar hipóteses no que toca ao formato dos veículos, a necessidade ou não de existir variação lateral.

No que toca ao formato dos veículos, e tendo em consideração a utilização de câmaras e sensores, a necessidade de existirem retrovisores desaparece. Isto significa que ou os veículos ficarão, no geral, mais estreitos ou, que mantendo a largura total, esta será de eixo a eixo. De qualquer das formas, a largura da via poderá ser mais próxima da largura, de eixo a eixo, dos veículos, sem as mesmas margens de segurança.

Para além disso, será necessário ter em conta a existência ou não de variação lateral. A variação lateral é a mudança da posição que um veículo ocupa durante o seu trajeto, dentro dos limites de uma via. Isto acontece naturalmente com condutores humanos, o que faz com que diferentes veículos passem por áreas distintas ao circularem na mesma via.

Ao realizar-se um projeto de estradas para veículos normais esta variação é considerada. Quando se consideram estradas para veículos autónomos, terá de se ter em conta a presença, ou não, no *software* dos VAs, a indicação para estes o fazerem artificialmente.

Faixa de rodagem

➤ Largura das vias

Ao considerar variação lateral, tendo em conta o aumento de segurança e a eliminação do fator humano da condução, pode-se considerar um cenário onde a largura das vias seja diminuída, deixando de haver margens de segurança consideradas para veículos comuns (Čudina Ivančev et al., 2022), que não serão necessárias numa estrada apenas utilizada por VAs.

No caso contrário, em que não se justifique variação lateral, a largura das vias terá sempre de, no mínimo, ser da largura do veículo mais largo que por ela circular. Isto quer dizer que poderá haver vias destinadas a veículos de cada largura, podendo otimizar o espaço ocupado pela estrada no seu todo.

➤ Sobrelargura nas curvas

Tal como no caso de veículos tradicionais, também para VAs é necessário considerar sobrelargura nas curvas de pequeno raio, especialmente quando se consideram veículos longos com reboque visto que os veículos autónomos longos também ocupam uma maior largura nas curvas do que em alinhamentos retos. No entanto, considerando vias diferentes para veículos de diferentes larguras, pode-se considerar vias apenas para VAs ligeiros, em que não é considerada a sobrelargura, ou reduzi-la substancialmente.

➤ Sobrelevação

A sobrelevação das curvas contribui, como já referido, para a segurança e comodidade de circulação, ao fazer com que a força centrífuga seja compensada pela força da gravidade. Para além disso, favorece a precessão das curvas, logo, a orientação ótica. Assim, tendo em conta apenas a funcionalidade dos VAs nas estradas, não seria necessário existir a sobrelevação supondo que os VAs não necessitariam de orientação ótica nem conforto para circularem em segurança. No entanto, não deixará de ser recomendada a sua existência, para que os passageiros mantenham os níveis de conforto desejados.

Bermas

Tal como anteriormente referido, as bermas servem para permitir a passagem de veículos de emergência, refúgio para veículos parados, como suporte lateral do pavimento da faixa de rodagem e para os veículos evitarem acidentes iminentes. Deste modo, tendo em conta que estas condições não seriam anuladas com a chegada dos VAs, não existe razão para que haja qualquer alteração.

Outas hipóteses

Para além do que foi referido, que seria a transição mais imediata entre estradas para VCs e estradas para VAs, podem-se propor outras hipóteses no que toca ao perfil transversal. Seria possível, por exemplo, alterar as estradas para um sistema de carris. Estes tipos de soluções já são utilizados para carros autónomos, como é o caso do túnel da empresa *The Boring company* que constrói túneis para carros autónomos, em que o pavimento é um tipo de carril de algum tipo de betão ou asfalto. Os veículos ainda necessitam de um acessório, mas poderão certamente vir a não o ter. Esta solução pode ser observada na Figura 4.4.



Figura 4.4 - Túnel para veículos autónomos

Este tipo de soluções pode ser aplicado em algumas situações, mas nem sempre e podem causar problemas para além de soluções. Caso surja um objeto repentinamente na zona de carril, não existe a possibilidade do veículo se movimentar lateralmente de forma desviar-se, apenas teria a opção abrandar.

Para além disso, seria sempre necessário haver zonas de mudança de via ou de saída ou entrada do carril. Num ambiente controlado apenas com uma via, como é o caso dos túneis referidos, estas questões já não se colocam.

Este tipo de solução tem a vantagem de haver uma poupança de recursos considerável: numa autoestrada, uma via de tráfego com 3,75 (m) de largura, poderia ser reduzida para dois "carris" de, por exemplo, 0,50 (m) o que pode refletir uma redução de cerca de 87% na quantidade de material utilizado.

4.4.4 Exemplo de estrada para veículos autónomos

De seguida, na Figura 4.5, pode-se observar, num esquema simplificado, as possíveis diferenças num alinhamento reto de uma estrada com duas vias em que os veículos circulam a uma velocidade de 90 km/h. Os VCs e os Vas circulam com a distância de visibilidade de paragem entre si e os VACs circulam em pelotão. Na elaboração deste esquema, considerou-se que tanto os VAs como os VACs poderiam operar com uma largura de via com 10 cm a mais, de largura, do que a do maior veículo a circular na estrada.

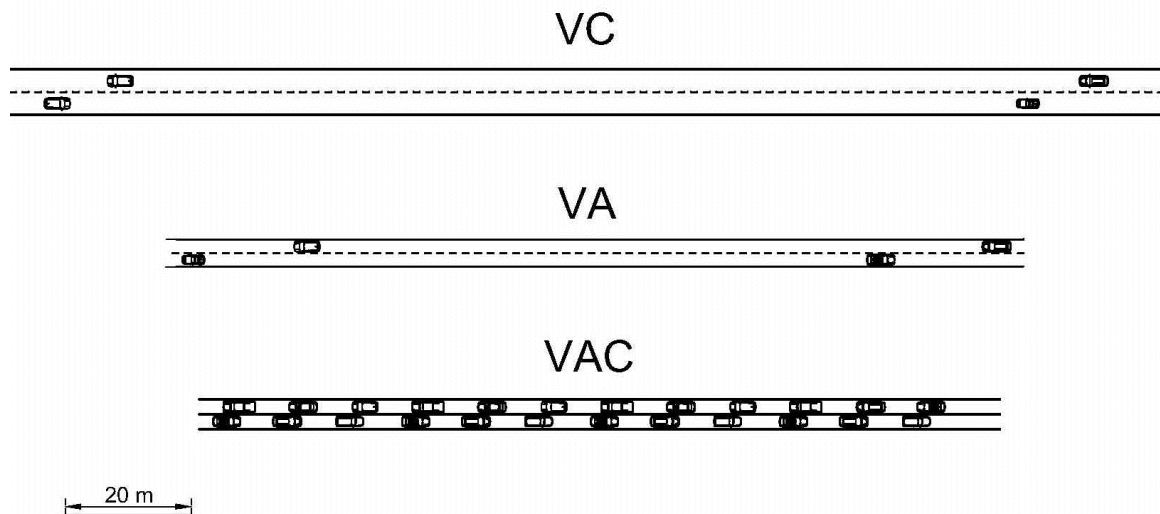


Figura 4.5 - Esquema de alinhamento reto para VCs, VAs e VACs

4.4.5 Análise geral

Ao analisar os resultados apresentados no capítulo 4.4 - Geometria das estradas para veículos autônomos, focando essa análise nos quadros apresentados ao longo do mesmo, para além das alterações geométricas que podem ser feitas às estradas para VAs, considerando a mesma velocidade de tráfego, pode-se concluir que mantendo os raios das curvas tanto em planta como em perfil longitudinal é possível considerar um aumento da velocidade de tráfego dos veículos comuns para os veículos autônomos em cerca de 20 km/h, sem pôr em causa a distância de visibilidade de paragem.

Efetivamente, as conclusões tiradas ao longo deste capítulo dão aso à colocação de novas hipóteses em relação à alteração da geometria das estradas, mas também à alteração da velocidade considerada, potencialmente mantendo a geometria. Na verdade, a diferença entre

estas hipóteses é meramente de perspectiva, visto que se pode abordar a mesma alteração dos dois pontos de vista.

4.5 Comodidade e segurança dos veículos autónomos

Não obstante o facto de os veículos autónomos não necessitarem de comodidade para circularem em segurança, mantém-se a necessidade de garantir o conforto dos ocupantes. Assim, é imprescindível ter a comodidade em mente ao projetar estradas para veículos autónomos.

Ao longo deste subcapítulo serão abordados os fatores já referidos no subcapítulo 3.5, e analisada a importância de cada um para o contexto dos veículos autónomos. Serão também analisados novos problemas que não se colocavam em relação aos veículos comuns.

4.5.1 Homogeneidade

Apesar de não ser necessária homogeneidade de traçado para que os veículos autónomos circulem em segurança, continua a ser importante que haja uma relação equilibrada entre curvas circulares sucessivas, por razões económicas e ambientais.

Já a relação entre o raio das curvas e o comprimento do alinhamento reto que precede a curva deixa de ter importância, tendo em conta que os veículos devem estar sempre à espera de heterogeneidade no traçado e isto não condiciona o conforto dos ocupantes.

4.5.2 Comodidade física

Continua a ser recomendado que a velocidade base não deva diferir em mais de 10 km/h, em trechos contínuos, para que não existam grandes variações de velocidade constantemente e assim manter o conforto.

Para além disso, continua a ser importante assegurar a cómoda variação de aceleração lateral e também a aceleração máxima.

Os raios mínimos normais têm como objetivo assegurar a segurança e a comodidade, assegurando uma força centrífuga de 50% do valor máximo admitido pelo que também não existe razão para estes serem alterados.

Para assegurar que a força centrífuga seja compensada pela força da gravidade, será recomendável, como já referido, manter a sobrelevação nas curvas, para que a comodidade dos ocupantes seja promovida.

4.5.3 Comodidade ótica

No contexto dos veículos autónomos, a comodidade ótica não se aplica. No entanto, há que considerar os sensores e câmaras do veículo.

O limite máximo de comprimento de alinhamentos retos serve para evitar o encadeamento noturno. No entanto, os VAs terão de ter a capacidade de operar em qualquer tipo de condições de iluminação, o que faz com que este limite não se aplique.

Da mesma forma, evitar orientações dos alinhamentos retos coincidentes com a direção nascente para evitar o encadeamento provocado pelo sol é uma questão que não deverá ser problemática no contexto dos VAs.

Os raios das concordâncias côncavas são limitados pela necessidade de assegurar a visibilidade noturna com faróis, o que é uma preocupação a manter, não tendo em conta os faróis e a visibilidade do condutor, mas sim em relação aos sensores e câmaras e a sua capacidade de perceber possíveis obstáculos ou até o traçado da estrada em si.

4.5.4 Novas preocupações

Apesar de os veículos não necessitarem de qualquer tipo de comodidade para operarem em segurança, é necessário garantir uma condução cómoda quando os VAs são ocupados por passageiros. Assim, é necessário ter alguns aspetos em conta:

- **Distância entre o veículo e o veículo que circula à frente:** Tendo em mente os VACs e a hipótese de estes formarem pelotões, há que considerar a distância a que os veículos circulam, para não causar incómodo aos passageiros.

- **Distância entre o veículo e o veículo que circula ao lado no mesmo sentido:** Ao colocar a hipótese da largura das vias ser reduzida para algo próximo da largura dos veículos, terá de se ter em conta a confortabilidade dos passageiros, podendo não ser cómodo haver outros veículos a circular na mesma direção a poucos centímetros do veículo.
- **Distância entre o veículo e o veículo que circula no sentido contrário:** Da mesma forma, será altamente desconfortável circular a poucos centímetros de veículos que transitam no sentido contrário.

4.6 Sinalização para veículos autónomos

Para além dos fatores geométricos, é necessário ter em atenção também a sinalização rodoviária e a forma com que é analisada pelos veículos autónomos. Os fabricantes de automóveis, apesar de terem como objetivo a possibilidade de os veículos autónomos serem eficientes nas estradas sem qualquer alteração, indicam que a consistência internacional, tal como nacional, no que toca à sinalização, era o ideal (Huggins & Austroads Sidney., 2017). Isto aplica-se não só à sinalização estática, mas também à sinalização eletrónica variável e ainda à sinalização horizontal.

4.6.1 Sinalização vertical

- Apesar de, como referido, haver o objetivo por parte dos fabricantes de fazer com que não sejam necessárias alterações, os mesmos indicam que seria vantajoso a sinalização ser constante, tanto sinalização estática como variável (EuroRAP & EURONCAP, 2013).

Sinalização estática

No que toca à sinalização estática, seria vantajoso para a rápida e eficaz leitura dos mesmos, o tipo de letra e o espaçamento entre caracteres ser constante, tal como o design dos mesmos.

Sinalização variável

Para a sinalização variável, seria vantajoso os sinais eletrónicos terem taxas de atualização e legibilidade de acordo com as necessidades dos veículos autónomos

4.6.2 Sinalização horizontal

Tendo em consideração VACs, será possível imaginar situações em que as faixas de rodagem da mesma estrada possam ter mais ou menos vias, consoante a hora do dia ou o trânsito na altura, havendo a possibilidade de fazer essa alteração de uma forma eficaz, já que os veículos terão essa informação automaticamente.

No futuro, poderá ser possível não ser necessário qualquer tipo de sinalização horizontal ou, caso necessário, apenas em casos específicos. Isto porque, os veículos autónomos poderão ter um mapa detalhado das estradas e o percurso ser feito automaticamente, sem a necessidade de haver linhas guia e outro tipo de sinalização horizontal.

No entanto, enquanto isso não for possível, os VAs necessitarão da atual sinalização horizontal para navegarem pelas estradas. Para tal, seria vantajoso a sinalização ter certas características, segundo os fabricantes de VAs (EuroRAP & EURONCAP, 2013):

- As marcações devem ser uma prioridade no orçamento de manutenção, com todas as estradas devidamente marcadas e mantidas para que sejam claramente visíveis e não causem confusão.
- Devem ser utilizadas marcações retro-refletivas que sejam visíveis em todas as condições climáticas.
- Padronizar em toda a Europa e no mundo, a cor e as dimensões das marcações de vias de tráfego e bordas de faixas de rodagem.

- Instalar linhas contínuas para delinear a borda da faixa de rodagem (EuroRAP & EURONCAP, 2013).

4.7 Pavimento para os veículos autónomos

Existem duas possibilidades a considerar quando se aborda o tema do pavimento nas estradas para veículos autónomos. A primeira é os mesmos terem indicações para variar lateralmente a sua posição, dentro da mesma via, para simular a forma aleatória com que os veículos comuns circulam dentro dos limites da mesma via. A segunda opção é, pelo contrário, definir que os veículos autónomos circularam sempre na mesma zona da via de tráfego.

É também necessário referir que, assumindo que pelo menos os primeiros VAs serão elétricos e necessitarão de baterias para armazenar energia, o peso dos veículos irá aumentar substancialmente, especialmente o dos veículos pesados. Posto isto, é necessário considerar este aumento de peso ao definir o pavimento das estradas bem como a estrutura subjacente a este. Efetivamente, é provável que este aumento de peso signifique um aumento do desgaste do pavimento de 20% a 40% (Low et al., 2023).

4.7.1 Variação lateral

Se a variação lateral imitar a variação lateral que ocorre naturalmente nos veículos comuns, apenas terá de ser contemplado o aumento de peso dos veículos referido anteriormente. Para além disso, existem outros problemas que podem vir a existir.

O estado geral das estradas, danos causados por acidentes e destroços na estrada podem ser mais problemáticos para veículos autónomos do que para veículos comuns. Isto porque não se sabe se os sensores serão capazes de fornecer informação a tempo de evitar uma pequena colisão (Huggins & Austroads Sidney., 2017). Para além disso, a distinção entre um destroço

que possa danificar o veículo ou um simples saco de plástico será certamente difícil em frações de segundo.

Deste modo, será recomendado haver uma inspeção, reparação e limpeza das estradas mais rápida e eficaz.

4.7.2 Sem variação lateral

Nesta situação, seria necessário considerar um pavimento mais duradouro, visto que, para além do aumento de peso dos veículos, inerente à chegada de VAs elétricos, a incidência sobre o mesmo aumentará drasticamente, o que pode influenciar o coeficiente de atrito, por exemplo.

Se não existir variação lateral, a capacidade de um veículo se desviar de um obstáculo na estrada poderá não existir, pelo que seria imprescindível manter as estradas em condições constantemente.

4.8 Recarregamento dos veículos autónomos

Apesar de haver a perspetiva de no futuro a fonte de energia dos veículos possa não ser apenas elétrica, havendo a possibilidade de ser por exemplo o hidrogénio, ou até outras fontes, os fabricantes estão neste momento a apostar em motores elétricos, logo, espera-se que seja a principal fonte de energia dos primeiros veículos autónomos.

Deste modo, é necessário considerar o carregamento dos veículos quando se aborda o tema dos requisitos de projeto das estradas. Existem atualmente carregadores em certos lugares de estacionamento para veículos elétricos, mas, como já foi referido, para uma situação em que todos ou a grande maioria dos veículos são elétricos, a rede elétrica atual não conseguirá fornecer energia a todos os veículos (Mouftah et al., 2020), especialmente nas horas de maior procura, que serão durante a tarde/noite.

Apesar de atualmente ser utilizado o carregamento por cabo, prevê-se que no futuro seja mais comum a utilização do carregamento sem fios. Esta forma de carregamento tem várias vantagens que podem vir a anular os pontos fracos dos veículos elétricos. Essas vantagens são as seguintes (Mouftah et al., 2020):

- Carregamento simples e automático
- Sistema pequeno e compacto comparado com o carregamento por fios
- Pode ser instalado abaixo da superfície
- Não existem conexões elétricas expostas
- O carregamento pode ser feito em andamento (Zaheer et al., 2017)

O último ponto é aquele que tem mais importância no que toca ao tema abordado nesta tese visto que faz com que seja de elevada importância a consideração de um sistema de carregamento em movimento quando se projeta uma estrada para veículos autónomos.

Existem várias hipóteses quando se coloca em causa o carregamento em andamento, tendo em conta estradas não urbanas.

Se for considerada uma hipótese em que todas as vias estão equipadas com este tipo de carregadores, a utilização de baterias seria quase inútil, o que faria com que um dos grandes problemas dos veículos elétricos, e autónomos também, como já referido, fosse resolvido.

Mesmo que nem todas as estradas tivessem equipadas com este tipo de carregadores por indução, ou houvesse apenas algumas vias destinadas a carregamento, com se pode observar na Figura 4.6 a autonomia dos veículos aumentaria sem que fosse necessário o aumento da dimensão ou do desempenho das baterias.



Figura 4.6 - Via para carregamento (Bourzik et al., 2022)

No entanto, estes sistemas também trazem problemas relacionados como o subcapítulo anterior: Pavimento para os veículos autônomos. A existência de dispositivos de carregamento embudidos no pavimento pode causar ao dobro do dano relativamente a um pavimento sem os mesmos. Isto porque podem causar fissuras, descolagem e deslizamentos. Desta forma, é recomendado que se considere um aumento da espessura do pavimento para solucionar estes problemas (Bozhi et al., 2023).

CONCLUSÕES

Tendo em conta o que foi averiguado ao longo desta dissertação sobre estradas para veículos autónomos, pode-se afirmar que este é um tema de extrema relevância para o futuro da mobilidade, revelando-se profundamente atual e desafiador.

Ao longo deste estudo, evidenciou-se que as implicações da introdução em massa de veículos autónomos nas estradas podem ser significativas e requerem uma reavaliação cuidadosa das infraestruturas existentes.

As principais conclusões deste trabalho residem na adaptação das estradas tradicionais para acomodar a presença de veículos autónomos, nomeadamente através da possibilidade de redução de margens de segurança. Esta redução deve-se sobretudo à redução drástica do tempo de perceção do ambiente por parte desses veículos, resultando numa diminuição da necessidade de existir uma grande distância de visibilidade. Isso, por sua vez, altera a necessidade de curvas em planta e em perfil longitudinal menos suaves e mais acentuadas.

No entanto, é importante questionar se todas essas adaptações e alterações nas estradas serão realmente vantajosas. Apesar de serem possíveis mantendo, no mínimo, o mesmo nível de segurança, há que manter também, um nível de conforto elevado.

A otimização das infraestruturas viárias para veículos autónomos implicaria custos significativos. No entanto, a longo prazo, tendo em conta a diminuição das margens de segurança e os raios das curvas, bem como, possivelmente, a diminuição da largura das estradas, os custos de construção poderão vir a diminuir. Pelo contrário, como referido, os custos de manutenção poderão vir a subir.

Para além das possíveis diferenças no que toca ao traçado e todas as suas consequências, os veículos autónomos trazem ainda outras possíveis alterações, nomeadamente ao nível da sinalização, do pavimento e do recarregamento. Para estas partes do complexo projeto rodoviário, ainda existe pouca informação e previsibilidade. No entanto, foram abordadas hipóteses neste estudo que podem vir a demonstrar-se de elevada importância no futuro próximo de desenvolvimento das tecnologias relacionadas com veículos autónomos.

Após a análise dos resultados deste estudo, destaca-se a relevância do tema das estradas para veículos autónomos. Este estudo identifica implicações significativas na infraestrutura viária, especialmente na adaptação das estradas tradicionais para acomodar veículos autónomos, abordando também a hipótese contrária, em que a estrada se mantém com a possível otimização da condução por parte destes veículos. O estudo questiona a verdadeira vantagem dessas adaptações, equilibrando alterações de elementos de projeto com a segurança e o conforto. Aborda os custos substanciais envolvidos na otimização da infraestrutura para veículos autónomos, explorando a possível diminuição dos custos de construção e o possível aumento dos custos de manutenção.

Este trabalho deixa em aberto várias questões que poderão vir a clarificar o futuro das estradas para veículos autónomos. Nomeadamente dúvidas em relação aos veículos autónomos em si, bem como a sua relação com a infraestrutura. Esclarecimentos futuros poderão vir a dar ferramentas mais precisas para a continuação desta análise crítica dos requisitos de projeto das estradas para veículos autónomos.

BIBLIOGRAFIA

- Abdulhafedh, A. (2020). Highway Stopping Sight Distance, Decision Sight Distance, and Passing Sight Distance Based on AASHTO Models. *OALib*, *07(03)*, 1–24. <https://doi.org/10.4236/oalib.1106095>
- Altintas, O., & Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2018). *2018 IEEE Vehicular Networking Conference (VNC)*.
- Al-Turki, M., Ratrouf, N. T., Rahman, S. M., & Reza, I. (2021). Impacts of autonomous vehicles on traffic flow characteristics under mixed traffic environment: Future perspectives. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 13, Issue 19). MDPI. <https://doi.org/10.3390/su131911052>
- Aryal, prabin. (2020). *Optimization of geometric road design for autonomous vehicle*.
- Beaudet, A., Larouche, F., Amouzegar, K., Bouchard, P., & Zaghib, K. (2020). Key challenges and opportunities for recycling electric vehicle battery materials. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 12, Issue 14). MDPI. <https://doi.org/10.3390/su12145837>
- Bourzik, M., Elbaz, H., & Elhilali Alaoui, A. (2022). The Optimal Deployment of the Entry and Exit Gates of Electric Vehicles Wireless Charging Transmitters on Highways. *World Electric Vehicle Journal*, *13(12)*. <https://doi.org/10.3390/wevj13120227>
- Bozhi, Mohamed, M., Gilani, V. N. M., Amjad, A., Majid, M. Sh., Yahya, K., & Salem, M. (2023). A Review of Wireless Pavement System Based on the Inductive Power Transfer in Electric Vehicles. *Sustainability*, *15(20)*, 14893. <https://doi.org/10.3390/su152014893>
- Čudina Ivančev, A., Dragčević, V., & Džambas, T. (2022). Road infrastructure requirements to accommodate autonomous vehicles. *Road and Rail Infrastructure VII*, *7*, 175–181. <https://doi.org/10.5592/co/cetra.2022.1462>

- EuroRAP, & EURONCAP. (2013). *Roads that caRs can Read A Quality Standard for Road Markings and Traffic Signs on Major Rural Roads Proposals for Consultation*. <http://www.euro-rap.org/media/93768/20110629-Roads%20That%20Cars%20Can%20>
- Faisal, A., Kamruzzaman, M., Yigitcanlar, T., & Currie, G. (2019). Understanding autonomous vehicles. *Journal of Transport and Land Use*, 12(1), 45–72. <https://doi.org/10.2307/26911258>
- Federal Automated Vehicles Policy Accelerating the Next Revolution In Roadway Safety*. (2016).
- Huggins, Rosie., & Austroads Sidney. (2017). *ASSESSMENT of Key Road Operator Actions to Support Automated Vehicles*. Austroads Ltd.
- InLR. (2010). *Revisao da Norma De Tracado*.
- Litman, T. A., & Litman, T. (2013). *www.vtpi.org Info@vtpi.org Phone 250-508-5150 Autonomous Vehicle Implementation Predictions Implications for Transport Planning*. www.vtpi.org/avip.docx
- Low, J. M., Haszeldine, R. S., & Harrison, G. P. (2023). The hidden cost of road maintenance due to the increased weight of battery and hydrogen trucks and buses—a perspective. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 25(3), 757–770. <https://doi.org/10.1007/s10098-022-02433-8>
- Luong, J. H. T., Tran, C., & Ton-That, D. (2022). A Paradox over Electric Vehicles, Mining of Lithium for Car Batteries. In *Energies* (Vol. 15, Issue 21). MDPI. <https://doi.org/10.3390/en15217997>
- Martínez-Díaz, M., Soriguera, F., & Pérez, I. (2019). Autonomous driving: A bird's eye view. In *IET Intelligent Transport Systems* (Vol. 13, Issue 4, pp. 563–579). Institution of Engineering and Technology. <https://doi.org/10.1049/iet-its.2018.5061>
- Maurer, M., Gerdes, · J Christian, Lenz, B., & Hermann, ·. (2015). *Autonomous Driving Technical, Legal and Social Aspects*.
- Milakis, D., Van Arem, B., & Van Wee, B. (2017). Policy and society related implications of automated driving: A review of literature and directions for future research. *Journal of Intelligent Transportation Systems: Technology, Planning, and Operations*, 21(4), 324–348. <https://doi.org/10.1080/15472450.2017.1291351>

Mouftah, H. T., Erol-Kantarci, M., & Sorour, S. (2020). *Connected and Autonomous Vehicles in Smart Cities*.

Mv, R., & Jaswal, A. K. (2015). *AUTONOMOUS VEHICLES: THE FUTURE OF AUTOMOBILES*.

Othman, K. (2021). Impact of Autonomous Vehicles on the Physical Infrastructure: Changes and Challenges. *Designs*, 5(40), 40-40–40. <https://doi.org/10.3390/designs5030040>

Zaheer, A., Neath, M., Beh, H. Z., & Covic, G. A. (2017). A dynamic EV charging system for slow moving traffic applications. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 3(2), 354–369. <https://doi.org/10.1109/TTE.2016.2628796>



2023

DUARTE APPLETON FIGUEIRA

ESTRADAS PARA VEÍCULOS AUTÓNOMOS: ANÁLISE CRÍTICA
DOS REQUISITOS DE PROJETO