

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

IMPACTO DA ADOÇÃO DE VEÍCULOS AUTÔNOMOS NOS CRITÉRIOS DE
PAVIMENTAÇÃO DE RODOVIAS: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DE LITERATURA

VICTOR HUGO MOREIRA FERREIRA

JUIZ DE FORA

2023

IMPACTO DA ADOÇÃO DE VEÍCULOS AUTÔNOMOS NOS CRITÉRIOS DE
PAVIMENTAÇÃO DE RODOVIAS: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DE LITERATURA

VICTOR HUGO MOREIRA FERREIRA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenação do Curso de Engenharia Civil da
Universidade Federal de Juiz de Fora, como
requisito parcial à obtenção do título de Bacharel
em Engenharia Civil.

Área de Conhecimento: Transportes e Geotecnia

Orientador: Prof. D.Sc José Alberto Barroso
Castañon

Coorientadora: Luísa Muglia Souza

Juiz de Fora

Faculdade de Engenharia da UFJF

2023

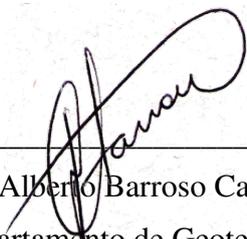
IMPACTO DA ADOÇÃO DE VEÍCULOS AUTÔNOMOS NOS CRITÉRIOS DE
PAVIMENTAÇÃO DE RODOVIAS: UMA REVISÃO DE LITERATURA

VICTOR HUGO MOREIRA FERREIRA

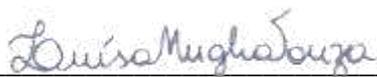
Trabalho de Conclusão de Curso submetido à banca examinadora constituída de acordo com a Resolução Nº 01/2018 do Colegiado do Curso de Engenharia Civil, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em: 19/12/2023

Por:



Prof. José Alberto Barroso Castañon, D.Sc (Orientador)
UFJF/Departamento de Geotecnia e Transportes



Eng. Luísa Muglia Souza (Coorientadora)
UFJF/Programa de Pós-Graduação em Ambiente Construído



Prof. José Luiz Lopes Teixeira Filho, D.Sc (Examinador 01)
UFJF/Departamento de Geotecnia e Transportes



Prof. Guilherme Soldati Ferreira, M.Sc (Examinador 02)
UFJF/Departamento de Geotecnia e Transportes

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha mãe, Lucivanda, pois tudo que faço é pensando em dar orgulho a ela, de maneira a transformar as nossas vidas para melhor. A ela, sempre serei grato por apoiar minhas decisões, mesmo quando, às vezes, essas escolhas parecem ser as mais equivocadas. Também agradeço ao meu pai, Marcos, pelo apoio e suporte, assim como a toda a minha família, que esteve ao meu lado em amparo e carinho.

Aos amigos, gostaria de agradecer especialmente a Arthur Dias, Pedro Barroso, Victor Higino e Vinicius Antônio. Tive o prazer de conhecê-los no meu primeiro dia de aula e o privilégio de tê-los ao meu lado até o último dia da graduação. Não posso dizer como seria a minha trajetória na faculdade sem eles, mas posso afirmar que os quatro a tornaram muito mais especial. Em um momento delicado que o mundo inteiro viveu durante a pandemia de COVID-19, estar com eles nesse período minimizou todos os efeitos possíveis que poderiam advir do isolamento social. Além deles, cito também a minha amiga e coorientadora para o desenvolvimento desse trabalho, Luísa Muglia. Nos conhecemos durante a pandemia e tive o agrado de entender o real significado da palavra “amizade” ao lado dela. Acredito que dificilmente conseguirei algum dia agradecê-la da forma que ela merece, mas fica o registro de toda a admiração e respeito que eu carrego por ela.

Aos professores, serei sempre grato por todo o aprendizado que compartilharam. Em especial, destaco o professor José Alberto Barroso Castañón, que me concedeu a primeira oportunidade ao permitir o desenvolvimento de pesquisas durante os dois anos de Iniciação Científica, sendo também meu orientador neste trabalho. Além dele, expresso minha gratidão à professora Cátia de Paula Martins, que me proporcionou a oportunidade de auxiliá-la como monitor da disciplina de Mecânica dos Solos 2. Por fim, agradeço a Universidade Federal de Juiz de Fora, que com muito orgulho posso dizer que se tornou minha *alma mater*. Sou grato pelo seu corpo docente, pelo apoio em relação às bolsas de incentivo à pesquisa que me foram concedidas e pelas permissões de uso da sua infraestrutura.

Para concluir, seria injusto afirmar que este período tenha se construído apenas em coincidências. Acredito que a fé foi fundamental para a conclusão deste ciclo, e, portanto, gostaria de agradecer a Deus por me permitir viver esse momento de forma tão especial e por me dar a oportunidade de me tornar alguém melhor.

RESUMO

A introdução de veículos autônomos (VAs) deve ocasionar uma série de implicações com base na interação entre estes e o sistema de transportes. Diante desse cenário, este estudo se propôs a investigar os impactos específicos da operação de VAs na infraestrutura rodoviária, concentrando-se nos critérios mecânicos de dimensionamento. Para realização da análise, foi conduzida uma revisão sistemática da literatura que identificou artigos científicos que abordassem o tema. A leitura desses trabalhos permitiu apontar as principais consequências da adoção de VAs, especialmente no que diz respeito à vida útil da infraestrutura rodoviária. Entre as características particulares da operação dos veículos autônomos, destaca-se a possibilidade deles se movimentarem em pelotão. Consequentemente, ao submeter o pavimento a ação de cargas repetidas, são esperadas implicações quanto às deformações permanentes e a formação de trincas. Logo, é de grande importância investigar e avaliar a extensão desses danos e como mitigá-los, a fim de otimizar a escolha de materiais para os projetos novos e de reforço, suprimindo as necessidades da via.

Palavras-chave: Veículos Autônomos. Infraestrutura Rodoviária. Pavimentação. Rodovias.

ABSTRACT

The introduction of autonomous vehicles (AVs) is expected to bring about a series of implications based on their interaction with the transportation system. In this context, this study aimed to investigate the specific impacts of AV operation on road infrastructure, focusing on mechanistic design criteria. To conduct this analysis, a systematic literature review was carried out to identify scientific articles addressing the topic. Examining these works allowed for identifying the main consequences of AV adoption, particularly concerning the lifespan of road infrastructure. Among the distinctive features of AV operation is their ability to travel in platoons. Consequently, subjecting the pavement to repeated loads will result in permanent deformations and crack formation. Therefore, it is important to investigate and assess the extent of these damages and how to mitigate them, aiming to optimize the selection of materials for both new and retrofit projects, addressing the specific needs of the roadway.

Keywords: Autonomous Vehicles. Road Infrastructure. Paving. Highways.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Fluxograma da seleção de artigos para a RSL.....	13
Figura 2 - Total de acidentes em rodovias federais por classificação entre 2007 e agosto de 2023	15
Figura 3 - Fatores que influenciam na condução do motorista.....	16
Figura 4 - Questões éticas e posicionamentos do público quanto o uso dos VAs.....	18
Quadro 1 - Níveis de automação para veículos autônomos	18
Quadro 2 - Tipos de comunicação dos VAs	20
Figura 5 - Projeções de vendas, frota e viagens de veículos autônomos.....	20
Figura 6 - Comparação entre os tipos de estruturas de pavimentos	22
Figura 7 - Classificação das Rodovias Avaliadas.....	22
Figura 8 - Tensões num pavimento	23
Quadro 3 - Resumo comparativo das características dos pavimentos.....	24
Figura 9 - Defeitos estruturais de trincamento e afundamento por repetição de cargas.....	27
Quadro 4 - Roteiro básico para um dimensionamento mecanístico-empírico.....	29
Figura 10 - Fluxograma do método de dimensionamento de pavimentos asfálticos - SisPav .	30
Figura 11 - Impacto dos caminhões em pelotões nos pavimentos	32
Figura 12 - Afundamento de Trilha de Roda.....	33
Quadro 5 - Resumo comparativo dos prós e contras da introdução dos VAs	24
Figura 13 - Consideração do desvio da roda	37
Figura 14 - Frequência da carga axial padrão.....	41
Figura 15 - Relação entre RD, CS e WFT para: (a) tráfego regular de caminhões e (b) carros autônomos.....	42
Figura 16 - Demonstração da redução do período de descanso devido ao efeito dos comboios	45
Figura 17 - Alinhamento ótimo para o pelotão com 10 caminhões	46
Figura 18 - Demonstração da solução proposta.....	47
Figura 19 - Gráfico de distribuição de probabilidade normal, uniforme e de Laplace, respectivamente	48

LISTA DE SIGLAS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
AEMC	Análise Elástica de Múltiplas Camadas
BGTC	Brita Graduada Tratada com Cimento
CFD	Computacional Fluid Dynamics
COPPE	Coordenação dos Programas de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia
CNT	Confederação Nacional do Transporte
CGS	Compactador Giratório Superpave
CS	Cross Slope
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
FN	Flow Number
GA	Generic-Algorithm
IA	Inteligência Artificial
IPR	Instituto de Pesquisas Rodoviárias
MeDiNa	Método de Dimensionamento Nacional
MEPDG	Mechanistic Empirical Pavement Design Guide
MR	Módulo Resiliente
OMS	Organização Mundial da Saúde
OPAS	Organização Pan-Americana da Saúde
PCG	Prensa Compactadora Giratória
PEDRO	Permanent Deformation for Roads
PS	Pattern-Search
RSL	Revisão Sistemática da Literatura
RD	Rutting Depth
SAE	Sociedade dos Engenheiros Automotivos
SHRP	Strategic Highway Research Program
Superpave	Superior Performance Pavement
STI	Sistema de Transporte Inteligente
SW	Particle-Swarm optimization
TDC	Top Down Cracking
TRC	Transporte Rodoviário de Cargas
TxME	Texas Mechanistic-Empirical Flexible Pavement Design
VA	Veículos Autônomos
VOH	Veículos Operados por Humanos
WFT	Water Film Thickness

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	11
1.1 OBJETIVO	12
1.2 METODOLOGIA.....	12
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	14
2 CONTEXTUALIZAÇÃO	15
2.1 MOBILIDADE AUTÔNOMA E SEGURANÇA VIÁRIA.....	15
2.2 DESENVOLVIMENTO DE VEÍCULOS AUTÔNOMOS	17
3 AVALIAÇÃO DA INFRAESTRUTURA	21
3.1 FUNÇÕES DOS PAVIMENTOS	23
3.2 HISTÓRICO DO DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS	24
3.3 ANÁLISE DE DESEMPENHO DO PAVIMENTO	26
3.4 O <i>SOFTWARE</i> MEDINA	28
4 IMPACTO DOS VEÍCULOS AUTÔNOMOS NA INFRAESTRUTURA VIÁRIA.....	31
4.1 AVALIAÇÃO DAS IMPLICAÇÕES QUANTO AOS CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO.....	34
4.2 APLICAÇÃO DO IMPACTO DE VEÍCULOS AUTÔNOMOS NO PAVIMENTO ..	37
5 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DOS PAVIMENTOS DEVIDO AO IMPACTO DA OPERAÇÃO DE VEÍCULOS AUTÔNOMOS	39
5.1 OS PRIMEIROS ESTUDOS.....	39
5.2 ANÁLISE QUANTO À PROFUNDIDADE DOS SULCOS.....	42
5.3 OUTROS MODELOS DE ABORDAGEM.....	43
5.4 ESTUDOS MAIS RECENTES	47
6 PROPOSTAS DE SOLUÇÕES	51
6.1 USO DE SENSORES DE ORIENTAÇÃO DE MOVIMENTO	51
6.2 USO DE PELOTÕES DESALINHADOS	52

6.3 O USO DE PNEUS MAIS LARGOS E DO MODELO DE ADAPTAÇÃO DAS RODOVIAS EM FUNÇÃO DA FROTA DE VAS.....	53
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	54
REFERÊNCIAS	56

1 INTRODUÇÃO

No contexto trabalhado, o termo “veículos autônomos” (VAs), se refere aos carros ou caminhões que podem ser operados sem a necessidade da intervenção de um ser humano para conduzi-los. Segundo a Sociedade dos Engenheiros Automotivos (SAE), é possível classificar o grau de automação em até cinco níveis. Essa categorização se inicia a partir do 0, em que não se manifesta qualquer condição tecnológica além da mecanização, e chega até o nível 5, em que os carros apresentam total independência, ou seja, automação completa (SAE, 2021).

Apesar de os VAs ainda estarem em desenvolvimento e não existir uma previsão assertiva de quando eles estarão disponíveis no mercado, é esperado que a introdução deles no contexto urbano crie novas demandas. Consequentemente, essa inovação da tecnologia será responsável por efeitos ainda hipotéticos. Tais decorrências aos sistemas de transporte terrestre afetarão tanto em questões de logísticas e planejamento urbano, quanto em relação à infraestrutura responsável por atender e suportar essa nova forma de mobilidade (Duarte; Ratti, 2018).

Especificamente no que tange à infraestrutura rodoviária, é possível observar alguns impactos que serão provocados pela introdução dos VAs. Segundo Leiva-Padilla *et al.* (2022), algumas delas se relacionam com a formação de pelotão no caso dos caminhões autônomos, a concentração do impacto em pontos específicos do pavimento devido a especificidades quanto à movimentação horizontal, além do menor intervalo de tempo entre a passagem entre um veículo e outro. Consequentemente, esses efeitos criarão danos representativos na estrutura, exigindo adaptações para acomodar a nova frota.

O planejamento é uma atividade que antecede ao desenvolvimento de qualquer ação. Seu principal objetivo é roteirizar atividades que acontecerão e, consequentemente, antever problemas antes que ocorram. Nessa condição, a organização do processo construtivo e de desenvolvimento de uma cidade dialoga entre pontos que permitam a acomodação e movimentação dos seus residentes. Portanto, é indispensável estudar o impacto de novos agentes de transporte, como os veículos autônomos, que são considerados uma tecnologia disruptiva (Fagnant; Kockelman, 2015), a fim de compreender as orientações que devem ser seguidas para projetos rodoviários mais efetivos, que estejam adaptados a essas novas demandas.

1.1 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é investigar a relação entre a introdução de veículos autônomos e as suas consequências para a infraestrutura rodoviária, explorando os impactos e desafios do tema, e quais suas implicações. Logo, espera-se que as informações contidas possam auxiliar em políticas públicas que sejam desenvolvidas e, posteriormente, efetuadas de forma ativa, a fim de impedir o desenvolvimento de um ambiente hostil à mudança, quando ela ocorrer.

Definem-se como objetivos específicos:

1. Revisar a literatura acerca dos veículos autônomos e projetos de pavimentação a fim de criar relações entre os temas;
2. Caracterizar os atributos da pavimentação rodoviária;
3. Analisar as consequências para o pavimento rodoviário por conta do funcionamento dos veículos autônomos;
4. Avaliar o desempenho do pavimento devido ao impacto do veículo autônomo, caracterizando as repercussões quanto ao desgaste, durabilidade e capacidade de carga;
5. Sugerir soluções que permitam melhorar o desempenho do pavimento, a partir de modificações no projeto, que permitam, assim, uma melhor adequação deste aos veículos autônomos.

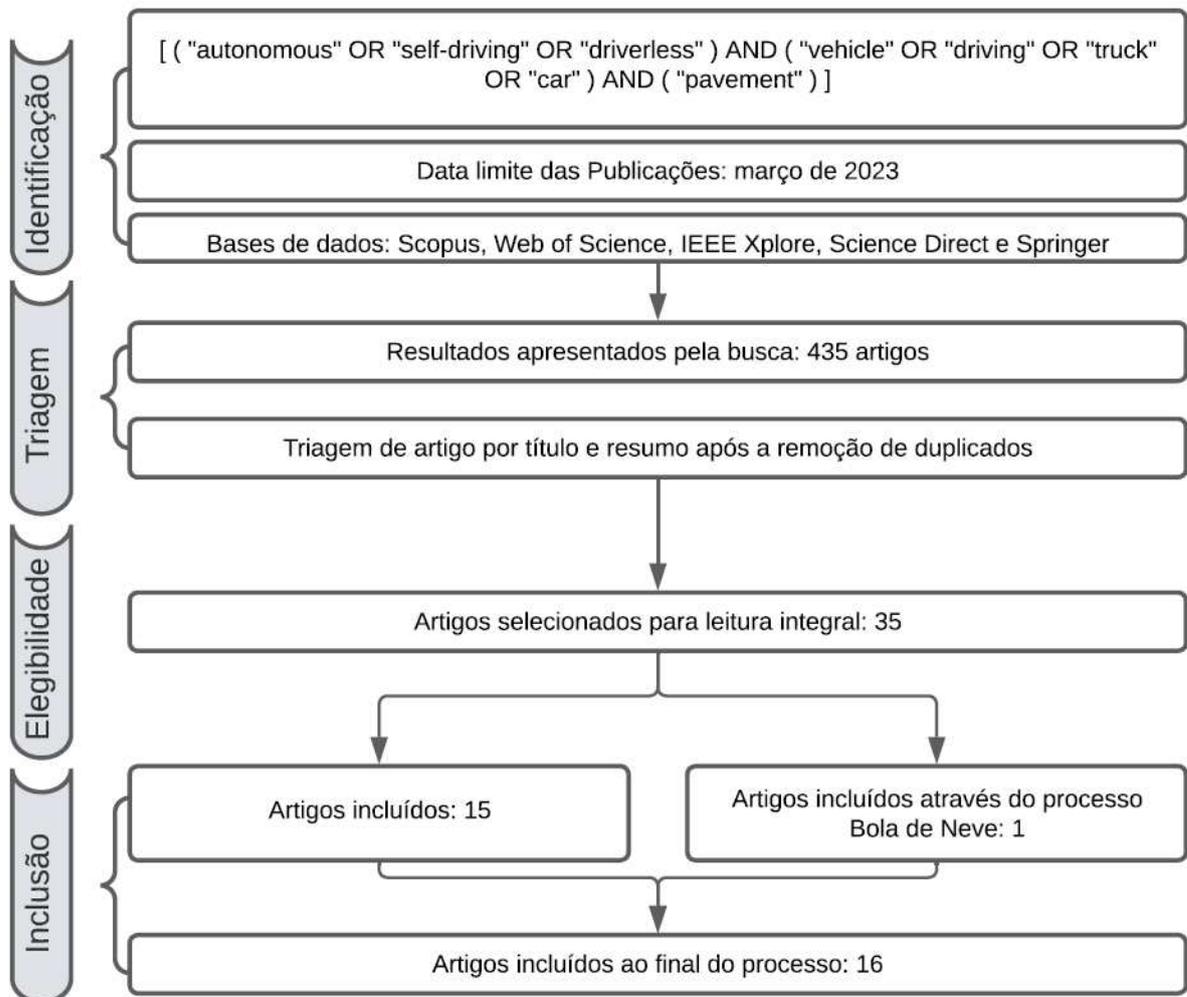
1.2 METODOLOGIA

A pesquisa se dá nos moldes de uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL). Para realização do processo de RSL, foram empregadas as recomendações metodológicas que apresentam preceitos do *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* - PRISMA (Mohler *et al.*, 2015). Mais especificamente, utilizou-se o seu fluxograma em quatro etapas: identificação, seleção, elegibilidade e inclusão dos artigos.

O processo de seleção de artigos ocorreu durante março de 2023. À época, foram utilizadas cinco bases de dados para o processo de triagem: Scopus, Web of Science, IEEE Xplore, Science Direct e Springer. As buscas foram realizadas em inglês, a fim de abranger um maior número de resultados. Os termos utilizados foram: [("autonomous" OR "self-driving" OR

"driverless") AND ("vehicle" OR "driving" OR "truck" OR "car") AND ("pavement")]. Foram incluídos artigos originais publicados até o ano de 2023. Monografias, dissertações, teses, artigos de opinião ou de congressos e outros estudos foram descartados. Com essas observações, ao todo, foram obtidos 435 resultados no total das cinco bases de dados. Dessa contagem, 30 artigos foram considerados elegíveis para leitura. Contudo, entre os artigos considerados elegíveis, dois não estavam disponíveis e um foi encontrado apenas em mandarim. Portanto, da triagem inicial de 435 trabalhos, apenas 27 foram lidos integralmente. Além disso, outros 8 artigos foram também considerados elegíveis a partir da técnica bola de neve, mas apenas 1 foi utilizado de fato para revisão. Um resumo desse processo foi elaborado no fluxograma disposto na Figura 1.

Figura 1 - Fluxograma da seleção de artigos para a RSL



Fonte: O autor

A etapa seguinte consistiu no estudo dos artigos selecionados, sendo que 16 foram considerados para a inclusão. Conseqüentemente, os dados foram analisados criticamente de maneira a integrá-los ao tema e ajustados para que possam cumprir os objetivos do artigo. A estruturação resultou em quatro tópicos de análise. Inicialmente são descritas as tendências da adoção de veículos autônomos. Em seguida, elaborou-se um prognóstico do impacto dos VAs sobre as rodovias. Conseqüentemente, foi analisada as conseqüências do dano ao pavimento. Por fim, são abordados os desafios para amenizar os resultados anteriores.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está estruturado em sete capítulos. Esta introdução diz respeito ao primeiro, no qual é realizada uma breve contextualização sobre o tema, apresentando os objetivos e informações adicionais relevantes acerca do objeto de estudo. No capítulo 2, são apresentados dados a respeito do contexto atual de trânsito e as decorrentes motivações para introdução dos veículos autônomos. O capítulo 3 esclarece informações teóricas a respeito da infraestrutura pavimentícia. São comentados os tipos de pavimentos existentes, abrangendo os pavimentos flexíveis e analisando quais as suas deficiências em função do uso. Por fim, foi realizada uma citação sobre a metodologia atual de dimensionamento dos pavimentos através do método MeDiNa. De maneira sequencial, no capítulo 4 realizou uma apuração sobre como os veículos autônomos afetam essa estrutura e demonstrou-se uma metodologia para quantificar esse impacto. No capítulo 5, é apresentada a revisão de literatura, em que são catalogadas as investigações encontradas acerca do tema. O capítulo 6 expõe outros estudos que buscam remediar os impactos relatados na seção anterior e ao final, no capítulo 7, discorre-se a respeito das considerações finais, bem como de sugestões para trabalhos futuros.

2 CONTEXTUALIZAÇÃO

2.1 MOBILIDADE AUTÔNOMA E SEGURANÇA VIÁRIA

Acidentes de trânsito são uma realidade em todos os lugares do mundo. Anualmente, estima-se que 1,3 milhão de pessoas morrem no mundo nesse tipo de evento, enquanto que o número de feridos chega a quase 50 milhões. Por conta disso, uma das metas da Agenda para o Desenvolvimento Sustentável 2030, é a redução desse número pela metade (OMS, 2021). No contexto brasileiro, essa situação se torna ainda mais agravante, pois, ainda de acordo com a Organização Mundial da Saúde (2021), o país é o quarto com maior número de óbitos, no continente americano (OPAS, 2018). Na figura 2, são disponibilizados dados a respeito dos acidentes no país.

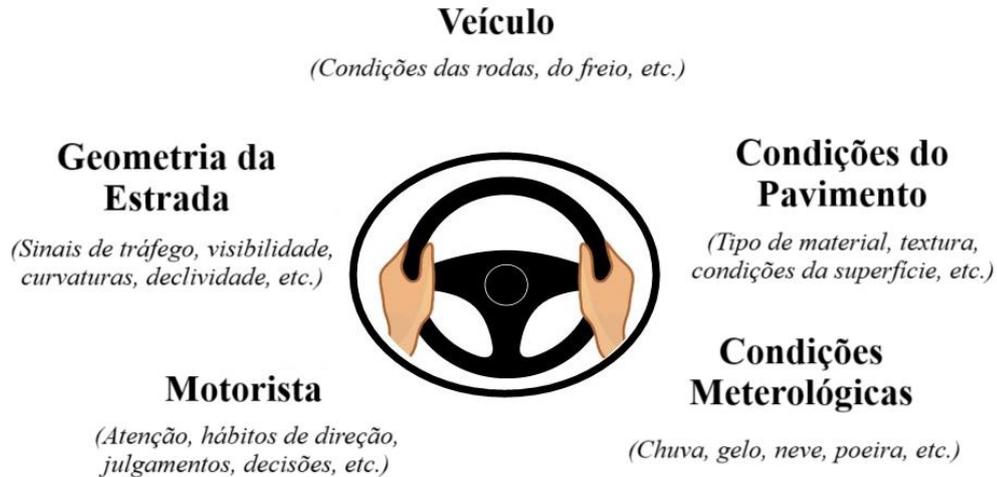
Figura 2 - Total de acidentes em rodovias federais por classificação entre 2007 e agosto de 2023



Fonte: CNT (2023)

A fim de transformar esse quadro, a utilização dos Veículos Autônomos seria uma forma de diminuir esses índices de acidentes. Isso porque para Steyn e Maina (2019), embora os veículos atuais sejam avançados tecnologicamente, o fato deles serem conduzidos por pessoas leva a uma grande variabilidade no modo como eles são operados. Por conta disso, reduzir essa oscilação, tornando essa movimentação previsível, se torna uma boa solução para a diminuição dos acidentes. Segundo Pomoni (2022), é possível resumir que as medidas preventivas para evitar acidentes nas estradas relacionam-se com as condições do veículo, a geometria da estrada, as condições meteorológicas e do pavimento e com o comportamento humano, como mostrado na Figura 3.

Figura 3 - Fatores que influenciam na condução do motorista



Fonte: Adaptado de Pomoni (2022)

Os veículos autônomos possuem outras finalidades, além do aumento de segurança aos seus passageiros. Além da maior prudência quanto à direção, para Fagnant e Kockelman (2015), os VAs podem diminuir os congestionamentos, os estacionamento e o número de veículos por habitantes, além de aumentar o número de quilômetros percorridos por pessoa (maior democratização das viagens).

Apesar das vantagens citadas anteriormente, também são previstas consequências negativas, sendo uma delas o impacto sobre os pavimentos (Othman, 2023). Levando-se em conta que as estradas são importantes economicamente para um país, respondendo por grande parte da demanda de transportes (Chen; Song; Ma, 2020), isso se torna um problema potencialmente grave quanto aos custos de manutenção.

Segundo Zheng *et al.* (2021), o pavimento asfáltico é adotado em mais de 80% de todos os tipos de estradas construídas no mundo. Ainda de acordo com o autor, devido às características da mistura asfáltica, temperatura externa e a sobrecarga dos veículos, esse material é propenso à produção de sulcos. Conseqüentemente, esses sulcos aumentam a influência no conforto da direção, estabilidade e segurança. Nessa conjuntura, de acordo com Gungor e Al-Qadi (2020a), os caminhões autônomos são um motivo de atenção devido ao fato de a sobrecarga ser um gerador de maior incidência desse tipo de problema, pois a tendência será aumentar com a introdução dos VAs.

Ainda conforme Gungor e Al-Qadi (2020a), os Estados Unidos passaram por um crescimento na demanda do Transporte Rodoviário de Cargas (TRC) que culminou no obstáculo da falta de motoristas para fazer esse serviço. Contudo, considerando o cenário da introdução dos VAs nesse setor, estima-se que a procura por esse tipo de operação cresça mais do que o esperado. Levando em consideração que no Brasil, aproximadamente 45% das empresas do setor possuem vagas disponíveis para motoristas (CNT, 2022a), o cenário anterior também pode ser previsto no país.

Além desse aumento no fluxo de viagens, outro ponto importante quanto à introdução dos VAs será o fato de eles terem maior exatidão na sua movimentação. Para Litman (2023), isso pode resultar em projetos de vias com faixas de movimentação mais estreitas. Consequentemente, devido a essa canalização do impacto, os índices de danos ao pavimento serão ainda maiores nessa situação, por conta dessa restrição quanto aos movimentos horizontais do veículo.

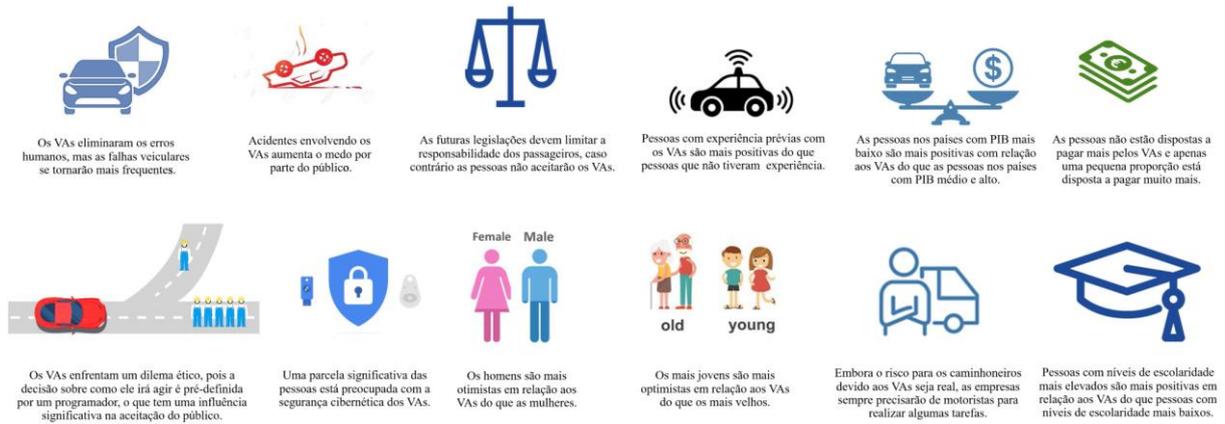
2.2 DESENVOLVIMENTO DE VEÍCULOS AUTÔNOMOS

O desenvolvimento dos Veículos Autônomos ocorre pelo menos desde meados do século passado. Segundo Kuru e Khan (2021), a produção desses carros se iniciou na década de 60. Entretanto, os primeiros casos de relativo sucesso começaram a ocorrer apenas dois decênios depois. Ainda de acordo com os autores, o principal desenvolvimento do setor tem ocorrido por conta de melhorias recentes, como uma maior automatização de processos através da inserção de sensores e Inteligência Artificial (IA).

A introdução dos veículos autônomos é um processo que irá ocorrer conforme a disponibilidade dessa inovação da tecnologia no mercado. Segundo Zhong e Li (2023), o verdadeiro *trade off*, isto é, o real custo no uso dos transportes, para os seus passageiros, é a perda do tempo. Portanto, a fim de evitar esse dispêndio, espera-se que a adesão aos VAs ocorra de maneira célere, conforme a disposição do novo serviço aos usuários.

Apesar da expectativa quanto a receptividade, diversas consequências são especuladas para interação em larga escala desse tipo de tecnologia com os usuários. Nesse contexto, Othman (2023) fez algumas considerações a respeito dos dilemas com relação à percepção e aceitação do público, em geral, como é visto na Figura 4.

Figura 4 - Questões éticas e posicionamentos do público quanto o uso dos VAs



Fonte: Adaptado de Othman (2023)

De maneira geral, os Veículos Autônomos podem ser classificados em seis níveis de automação (SAE, 2021), conforme o Quadro 1. Para Steyn e Maina (2019), os efeitos específicos nos pavimentos começam no nível 2, que configura uma automação parcial e vai até o nível 5, caracterizado pela automação total do veículo.

Quadro 1 - Níveis de automação para veículos autônomos

Nível SAE	Nome SAE	Definição narrativa
0	Não Automatizado	Sem controles de veículos autônomos. A condução pode ser melhorada através de sistemas de alerta ou de intervenção. Motoristas humanos fazem tudo dirigindo.
1	Assistido	Motoristas humanos controlam tarefas críticas de direção, podendo receber assistência tecnológica menor (por exemplo, assistência ao sistema com direção operacional, controle de aceleração/desaceleração, controle de estabilidade, controle de cruzeiro, tecnologia de correção de faixa).
2	Automação Parcial	O veículo assume as capacidades de direção e aceleração/desaceleração em cenários selecionados. Motoristas humanos ainda continuam no controle do veículo o tempo todo.
3	Automação Condicional	O veículo controla com segurança todos os aspectos da condução no ambiente mapeado. O motorista humano precisa estar a bordo, monitorando e gerenciando mudanças em ambientes rodoviários ou cenários de imprevistos.
4	Alta Automação	Nenhuma interação humana com o motorista é necessária. Pode parar se o sistema falhar. Lida com a condução do ponto A ao ponto B na maioria dos casos. No veículo
5	Automação Total	Completamente autônomo, nenhum envolvimento em intervenção do motorista humano.

Fonte: SAE International (2021) - Adaptado

Segundo Georgouli e Plati (2022), essa consequência sobre a infraestrutura viária a partir do nível 5, pode ser descrita principalmente por conta do tráfego dos caminhões autônomos. O principal motivo seria a mudança na forma como esses veículos se locomovem. Por conta da movimentação deles ser influenciada pela diminuição da tomada de decisões por humanos na direção, há uma maior segurança envolvida nessa relação, o que permite tornar possível a formação de pelotões de caminhões a curta distância, reduzindo o consumo de combustível (She; Oyuang, 2022), devido à maior eficiência aerodinâmica e à consequente diminuição do arrasto por conta da pressão do ar (Alonso-Estébanez *et al.*, 2018).

Para She e Oyuang (2022), a efetivação desse sistema cria uma operação desigual entre os usuários e as empresas de logística em geral, quando comparadas em relação às concessionárias (públicas ou privadas) responsáveis pela manutenção dessa infraestrutura. Enquanto os pelotões desfrutam economicamente dos menores custos em combustível e manutenção dos veículos, essa despesa é repassada para as encarregadas em manter as boas condições do pavimento.

Apesar de ainda parecer distante, o cenário de introdução dos VAs no trânsito já é uma realidade em alguns países. Segundo Rana e Hossain (2021), a implementação desse tipo de transporte tem ocorrido de maneira progressiva. Como exemplo, durante a crise recente provocada pela doença infecciosa do coronavírus SARS-CoV-2, a empresa Neolix utilizou carros autônomos para suprir algumas necessidades médicas em alguns lugares da China (Donelson, 2020).

Entre as razões que permitem essa inserção dos VAs e as garantias de maior segurança desse tipo de transporte, está a maior eficiência na tecnologia de comunicação e a possibilidade dele se tornar também um veículo conectado. Esse tipo de veículo se caracteriza por ser um Sistema de Transporte Inteligente (STI). Consequentemente, com a quinta geração de redes móveis celulares (5G), esse serviço tem maior potencial de inserção no mercado (Steyn; Maina, 2019). Essa tecnologia é importante por permitir os vários tipos de comunicação que os carros e caminhões podem fazer, como demonstrado no Quadro 2.

Quadro 2 - Tipos de comunicação dos VAs

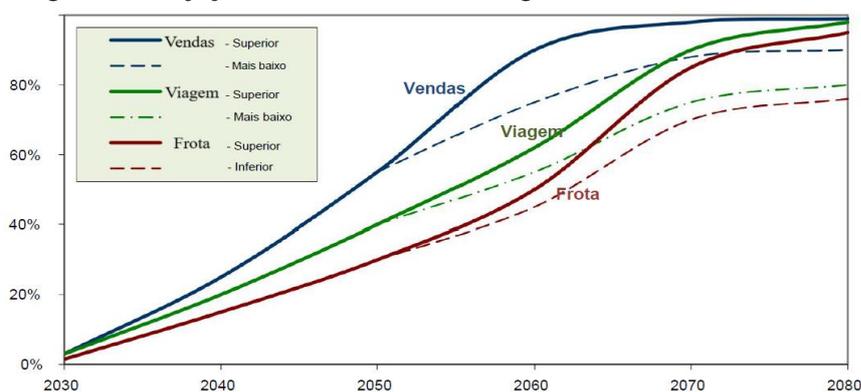
Nome	Tipo de Conexão	Função
V2V	Veículo para Veículo	Possibilita a comunicação entre veículos. A partir disso, a frota pode advertir sobre problemas específicos, como frenagens bruscas, etc. (Harding <i>et al.</i> , 2014).
V2I	Veículo para Infraestrutura	Permite que os veículos dialoguem com a infraestrutura rodoviária, caso dos semáforos, por exemplo. Consequentemente, permite-se uma melhor gestão por parte da concessionária responsável e orienta os usuários a evitar regiões em que a estrutura esteja sob estresse. (Harding <i>et al.</i> , 2014).
V2X	Veículo para Tudo	Proporciona a interação entre os veículos e as condições gerais, permitindo que essa comunicação ocorra de forma dinâmica. Em vista disso, as rotas são determinadas a partir da seleção das melhores condições possíveis para o transporte.

Fonte: Adaptado de Steyn e Maina (2019)

No contexto atual de desenvolvimento da tecnologia, torna-se difícil que ocorra uma evolução disruptiva que permita que ocorra a massificação dela, de maneira abrupta. Consequentemente, é possível prever que a penetração dos VAs no mercado ocorrerá aos poucos, criando situações de veículos mistos no transporte de pessoas e cargas (Chen *et al.*, 2019). Ou seja, será comum a ocorrência de veículos autônomos ou não, que dividirão as estradas.

Para Litman (2023), que fez um estudo sobre as implicações da adesão dos VAs, é possível fazer uma previsão a respeito de como se desencadeará o uso dessa tecnologia, conforme a Figura 5. Supondo que os VAs sigam as tecnologias anteriores, levará de uma a três décadas para que eles dominem as viagens de veículos.

Figura 5 - Projeções de vendas, frota e viagens de veículos autônomos



Fonte: Litman (2022) - Adaptado

3 AVALIAÇÃO DA INFRAESTRUTURA

Segundo Bernucci *et al.* (2022), do ponto de vista estrutural e funcional, é possível definir o pavimento como uma ordenação de múltiplas camadas de espessuras construídas sobre uma superfície final de terraplenagem. Essa organização é disposta técnica e economicamente a suportar os esforços oriundos do tráfego de veículos e do clima. Além disso, ela deve oferecer as melhores condições possíveis para os seus usuários quanto ao rolamento, conforto, economia e segurança.

Além disso, para o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2006), a camada de terraplenagem, designada por subleito, trata-se de um semi-espaco considerado teoricamente como infinito. Ele possui a função de atuar como infraestrutura, ou seja, como terreno de fundação. Por conta disso, ele deve ser estudado e considerado até a profundidade em que atuam as cargas solicitantes do tráfego. Segundo o manual de pavimentação, esse valor está situado entre 0,60m e 1,50m de profundidade (DNIT, 2006). Caso seja necessário, em sequência ao subleito, pode ser utilizado um reforço para ele.

Posteriormente, são colocadas as camadas utilizadas como base e sub-base. Elas podem variar quanto à composição dos materiais. Geralmente, os compostos com maior flexibilidade são constituídos por materiais granulares ou estabilizados (com aditivos). Ademais, elas podem ser desenvolvidas a partir de elementos rígidos, caracteristicamente, as de concreto de cimento portland, o que eleva sua resistência à tração (DNIT, 2006).

Por fim, a última camada é a do revestimento, que é a principal responsável por garantir as condições de rolamento, conforto, economia e segurança aos usuários, devido ao fato de ser o contato direto com as rodas dos veículos. Segundo Bernucci *et al.* (2022), sua função é a de resistir às ações do tráfego, reduzi-las e transmiti-las de forma atenuada aos extratos anteriores. Além disso, dependendo da composição dessa parcela, ela pode ser confeccionada a partir de materiais rígidos, semirrígidos ou flexíveis, como mostra a Figura 6.

Figura 6 - Comparação entre os tipos de estruturas de pavimentos



Fonte: DER-PR (2008)

Segundo dados disponibilizados pela Confederação Nacional de Transportes (CNT), até o ano de 2022, a malha rodoviária do país possuía uma extensão de 1.720.909 quilômetros. Contudo, apenas 213.500 quilômetros (12,4%), são pavimentados (CNT, 2022b). Essa situação piora quando comparada a dados referentes ao ano de 2011. Enquanto que as rodovias sofreram um acréscimo inexpressivo quando se comparam os períodos, a frota de veículos registrados aumentou em 58% no mesmo intervalo.

Ainda segundo a CNT (2022b), em 66% das rodovias avaliadas, é possível identificar algum tipo de problema em seu estado geral, sendo que 55,5% dos trechos avaliados possuem problemas no pavimento. Na Figura 7, estão retratadas avaliações das rodovias no país.

Figura 7 - Classificação das rodovias pavimentadas que foram avaliadas

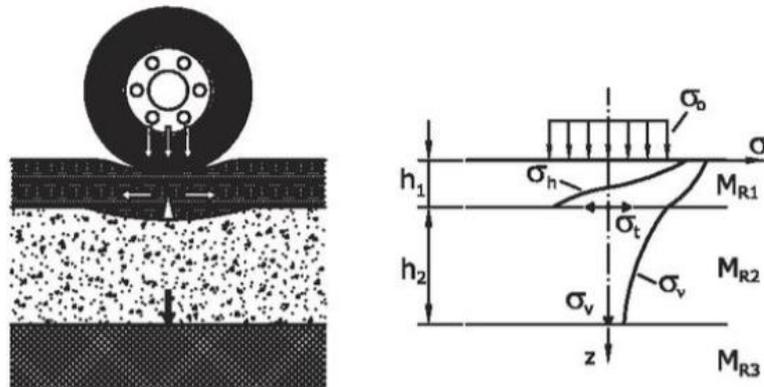


Fonte: CNT (2022b)

3.1 FUNÇÕES DOS PAVIMENTOS

Segundo Medina e Motta (2015), do ponto de vista estrutural, a principal função do pavimento é a de resistir às cargas de tensões verticais, além das de tração e compressão, provocadas pelos veículos. No pavimento flexível, seu critério de ruptura seria o afundamento resultante das deformações permanentes, devido à baixa (quase nula) resistência à tração. Enquanto isso, o pavimento rígido é aquele cujo modelo de ruptura seria o trincamento por recorrência das deformações elásticas. A Figura 8 demonstra como as tensões agem no pavimento.

Figura 8 - Tensões num pavimento



Fonte: Medina e Motta (2015)

Do ponto de vista funcional, as superfícies correspondentes aos revestimentos devem ser bem-acabadas geometricamente. Elas devem possuir baixo grau de irregularidades, o que conseqüentemente irá gerar conforto, portanto, há um menor custo operacional ao usuário. Além disso, essa camada deve ser rugosa, a fim de auxiliar na frenagem e dificultar o efeito da aquaplanagem, aumentando a segurança do motorista (Bauer, 2018a). O Quadro 3 resume e compara as propriedades de cada tipo de pavimento.

Quadro 3 - Resumo comparativo das características dos pavimentos.

	Pavimento Rígido	Pavimento Flexível	Pavimento Semi-Flexível
Material	Concreto	Asfalto	Piso intertravado de concreto
Tipo de Estrutura	Estruturas mais delgadas de pavimento	Estruturas mais espessas (requer maior escavação e movimentação de terra) e camadas múltiplas	Requer cuidados com a compactação do terreno. Espessura média do pavimento a partir de 4 cm para o tráfego de pessoas e 6 a 8 cm para o tráfego de veículos
Resistência Química	Resiste a ataques químicos (óleos, graxas e combustíveis)	É fortemente afetado por produtos químicos	Resiste à ataques químicos
Manutenção	Pequena necessidade de manutenção e conservação, o que mantém o fluxo de veículos sem interrupções	Necessário que se façam várias manutenções e recuperações, com prejuízos ao tráfego e custos elevados	Manutenção baixa, sendo possível substituir peças
Segurança	Falta de aderência das demarcações viárias, devido ao baixo índice de porosidade. Necessário vassouramento para aumentar o atrito	Melhor aderência das demarcações viárias, devido a textura rugosa e alta temperatura de aplicação. Maior possibilidade de a pista ficar escorregadia	Marcação viária é feita com peças de outras cores, e, portanto, não há necessidade de remarcações. Atrito alto com os pneus, aumentando a aderência
Durabilidade	Vida útil mínima de 20 anos	Vida útil máxima de 10 anos (com manutenção)	Vida útil mínima de 15 anos
Custo Inicial	Elevado	Baixo	Intermediário
Tempo de Execução	Mais demorado	Mais rápido	Não necessita de cura e pode ser liberado no mesmo dia
Mão de Obra	Mecanizada ou não	Uso de maquinário específico	Mecanizada ou não

Fonte: Adaptado de Tetracon (2019)

3.2 HISTÓRICO DO DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

Os projetos de pavimentos flexíveis se desenvolveram a partir de métodos empíricos. Conseqüentemente, esse tipo de caracterização é baseado na especificidade do material, contrastando com a metodologia mecanística, em que essas propriedades são medidas. Apesar

do benefício desse último, ainda não é possível criar uma técnica puramente mecânica, devido à complexidade em modelar o comportamento dos materiais. Em vista disso, esse tipo de projeto sempre se vincula a uma fase de validação e calibração (empírica), ajustando o desempenho modelado, ao que é esperado em campo (Prime, 2008).

Em vista dessas considerações, de acordo com Medina e Motta (2015), surge o conceito de deformação resiliente (elástica) do material ou Módulo Resiliente (MR). Nessas condições, o termo ‘resiliência’ equivale a quantidade de energia potencial de deformação que estará armazenada no corpo modificado elasticamente, e que será devolvida quando terminada as tensões responsáveis pelas deformações. Em consonância, segundo Marques (2004), o princípio da mecânica dos pavimentos é a análise de uma estrutura que é feita a partir das relações de tensão-deformação dos materiais que compõem as camadas.

De acordo com Bauer (2018b), considera-se o módulo de elasticidade (E) como uma resistência do material à deformação. Consequentemente, quanto mais rígido ele for, maior será o seu valor. Pode-se dizer também que menor será a sua deformação elástica quando aplicada uma dada tensão. Para Marques (2004), apesar de os módulos elástico e resiliente serem análogos, sendo que ambos são definidos pela relação entre tensão (σ) e deformação (ϵ), o ensaio de determinação deles se diferencia. Enquanto define-se E em um ensaio de carregamento fixo, o MR é determinado a partir de um ensaio de cargas repetidas. O autor completa dizendo que, nesse modelo de investigação, os valores de pico das tensões e das deformações recuperáveis que acontecem são utilizados para definir a constante elástica resiliente.

Segundo Borges (2019), até a década de 70, a caracterização das misturas asfálticas era feita por parâmetros estáticos, como o método Marshall, que utiliza a compactação por impacto. Posteriormente, de acordo com Bernucci *et al.* (2022), várias rodovias apresentaram deformações permanentes em um período não condizente com o seu dimensionamento. Tal acontecimento se devia ao fato de o impacto provocado nos corpos de prova (CPs) exigir uma dosagem de ligante asfáltico maior do que a necessária.

Durante a década de 80, foi proposto o *Superior Performance Pavement* (Superpave) pela *Strategic Highway Research Program* (SHRP). Seu objetivo é auxiliar na escolha de materiais e projetos de mistura. Ao especificar, projetar e analisar as misturas asfálticas, é possível prever o desempenho dos pavimentos (Marques, 2004). Segundo Bernucci *et al.* (2022), essa

formulação foi uma evolução em relação às primeiras especificações que utilizavam ensaios simples e empíricos. Conseqüentemente, a abordagem do Superpave, que leva em consideração a caracterização viscoelástica e do dano, permitiu um grande avanço na qualidade do material utilizado em campo.

Ainda de acordo com Bernucci *et al.* (2022), houve uma diferenciação quanto ao método de seleção dos agregados, ao não optar pela seleção de agregados com maior densidade. A introdução dos conceitos de ponto de controle e zona de restrição, fez com que os agregados tivessem mais vazios e permitisse a incorporação suficiente de ligante, aumentando a durabilidade e evitando a exsudação. Posteriormente, com os estudos de Fuller, foi elaborada uma curva granulométrica para determinar a porcentagem máxima de passante em uma peneira. Para Bauer (2018a), caso não seja deixado esse volume de vazios, as misturas deixam de ser estáveis às solicitações do tráfego. Conseqüentemente, ocorre o fenômeno de fluência. De acordo com o autor, o ideal é que sejam deixados de 3% a 5% de volume vazios.

Ao mesmo tempo, alterou-se o caráter da compactação no ensaio. Foi proposta a mudança do método de impacto (golpes) e se adotou a utilização do método de amassamento (giros) do material, a partir do Compactador Giratório Superpave (CGS) ou Prensa Compactadora Giratória (PCG). Conseqüentemente, essa mudança exige menos ligante asfáltico para a mistura, o que irá condizer de forma mais realista com as exigências do pavimento (Bernucci *et al.*, 2022). De acordo com Medina e Motta (2015), uma mudança perceptível do uso do método mecanístico-empírico se relaciona com o fato de que o aumento da espessura das camadas não é a solução óbvia em todos os casos de acréscimo de solicitações de tráfego. Como efeito, isso se contrapõe com a metodologia anteriormente utilizada, que adotava uma espessura mínima de revestimento, em função do número de repetições do eixo padrão adotado para representar o tráfego.

3.3 ANÁLISE DE DESEMPENHO DO PAVIMENTO

De acordo com Bauer (2018a), os métodos de dosagem de misturas asfálticas devem oferecer o teor de ligante que melhor se adapte a graduação de agregados e partículas especificada em projeto, de maneira que a mistura que será aplicada em campo possa resistir simultaneamente à formação de trilhas de roda ou deformação permanente, além da fadiga, e à desagregação.

Segundo Bernucci *et al.* (2022), um bom desempenho das camadas de pavimentação e do subleito, se relaciona com a capacidade de suporte e de durabilidade compatível com o padrão da obra e o seu tipo de tráfego, além do conforto ao rolamento e a segurança dos usuários. Por conseguinte, é possível fazer avaliações do pavimento de maneira funcional e estrutural, a partir do instante em que ele passa a ser solicitado pelas cargas dinâmicas e pelos efeitos do ambiente.

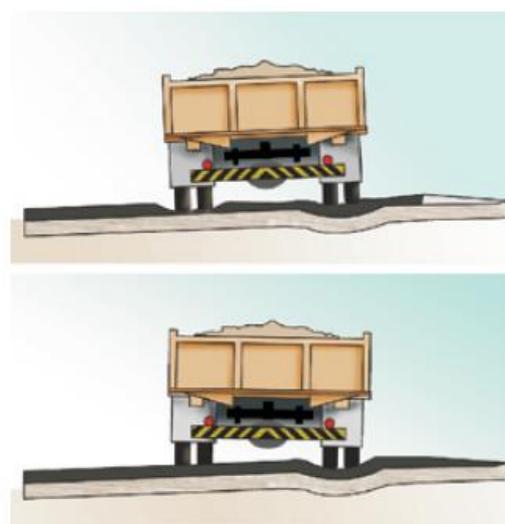
A avaliação funcional do pavimento vincula-se à avaliação da superfície do pavimento e como esse estado influencia no conforto ao rolamento, condição da superfície, interação pneu-pavimento, defeitos e irregularidades. Já a avaliação estrutural se relaciona com a capacidade de carga suportada, portanto, ao seu dimensionamento. Esse tipo de defeito vincula-se às deformações elásticas (recuperáveis) e plásticas (permanentes) (Bernucci *et al.*, 2022).

Ainda de acordo com Bernucci *et al.* (2022), a passagem de roda sobre o pavimento gera um deslocamento oriundo da soma de duas componentes. A manifestação da maioria dos trincamentos ao longo da vida dos pavimentos, que como resultado, podem provocar a fadiga do revestimento, possuem origem das deflexões elásticas. Enquanto isso, as deformações permanentes são responsáveis pelo afundamento localizado que resulta no afundamento de trilha de roda. Deformação essa que também é uma metodologia de avaliação da vida útil do pavimento. Os dois modelos de deflexões estão exemplificados na Figura 9.

Figura 9 - Defeitos estruturais de trincamento e afundamento por repetição de cargas



(a) Fadiga



(b) Deformação permanente

Fonte: Adaptado de Bernucci *et al.* (2022)

Caracterizar a evolução das trincas e deformações permanentes que se apresentam no pavimento é fundamental. De acordo com Medina e Motta (2015), a tendência de utilização do método mecanístico-empírico será aprimorada a partir do dimensionamento fundamentado em sólidas bases analíticas e experimentais. Logo, é necessário ajustar as relações matemáticas que preveem os danos ou critérios de ruptura a fim de adequar o pavimento para as condições particulares de uma região, de um clima, das técnicas construtivas ou dos hábitos de carga, etc.

Somente a observação sistemática da evolução dos defeitos ou danos - trincamento (fadiga, ação térmica, propagação de trincas), e deformação permanente nos pavimentos, principais defeitos estruturais, permite a validação dos modelos de dano de um método mecanístico-empírico. (Medina e Motta, 2015, p. 338)

Conseqüentemente, ainda segundo os autores, isso suscita na observação de trechos experimentais, na contagem e pesagem de caminhões e ensaios não destrutivos de auscultação estrutural (deflectometria, geosonda ou georadar, mapeamento dos defeitos, etc.).

3.4 O SOFTWARE MEDINA

No Brasil, para auxiliar no dimensionamento dos pavimentos flexíveis, foi criado o *software* MeDiNa (Método de Dimensionamento Nacional), (IPR, 2020a). Desenvolvido em C++, sua produção contou com a participação do Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR) em parceria com o Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia da Universidade do Rio de Janeiro (COPPE). É possível considerá-lo uma evolução do SisPav, que foi o *software* desenvolvido na tese de doutorado de Franco (2007), tornando-se de âmbito nacional.

Segundo o IPR (2020a), o programa é dividido em três. O primeiro seria para Análise Elástica de Múltiplas Camadas (AEMC), que permite calcular as tensões e deformações. Ele serve como um componente dos dois programas seguintes, o BackMeDiNa e o MeDiNA. Nesses, o primeiro é utilizado para o cálculo do módulo de deformação (rigidez) e o segundo prevê as dimensões do pavimento. De acordo com o IPR (2020b), o critério de dimensionamento ou análise através do *software*, é a formação de fissuras (área trincada) e/ou deformação permanente. Portanto, a análise é feita de maneira mecanística-empírica, assim como o método anterior (DNIT). Em vista disso, é possível identificar que, para o uso do programa, utiliza-se o roteiro básico de dimensionamento para a metodologia, seguindo os seguintes passos explicitados no Quadro 4.

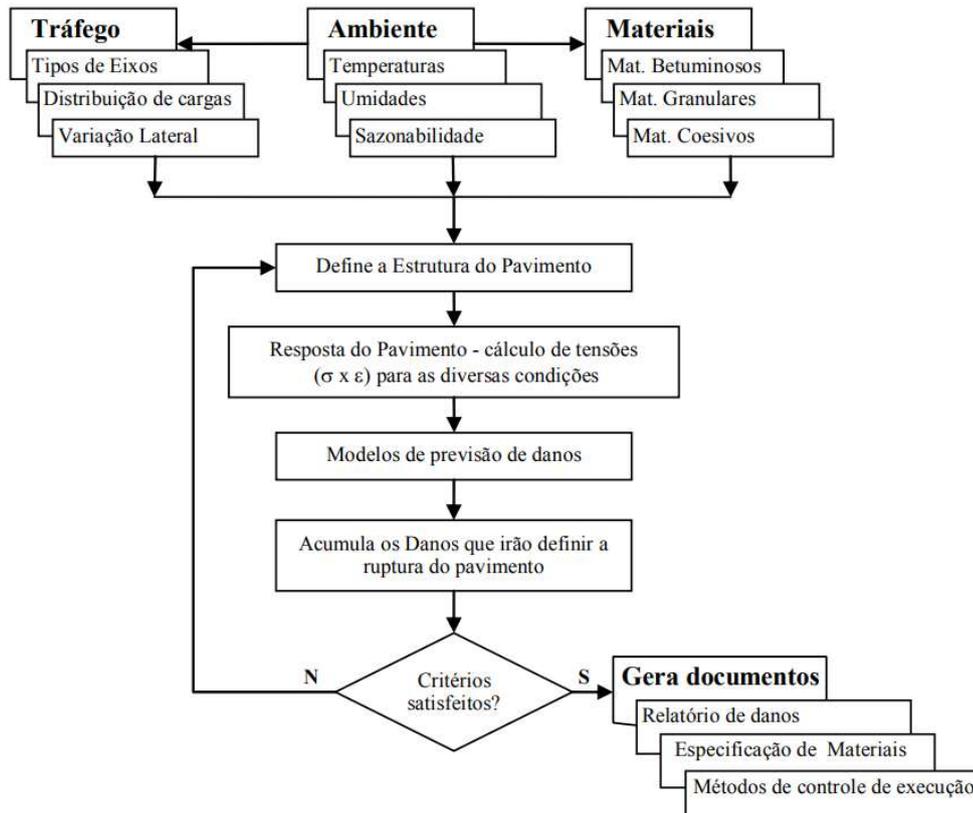
Quadro 4 - Roteiro básico para um dimensionamento mecanístico-empírico.

1) Definir o número N de projeto considerando as informações do tráfego previsto (volume médio diário, taxa de crescimento, pesos por eixos, etc.).
2) Ensaiar os materiais disponíveis na região e no subleito para se obter os módulos de resiliência e as leis de deformação permanente, considerando as variações de umidade que possam ocorrer.
3) Definir um valor de módulo de resiliência para a mistura asfáltica a ser utilizada no revestimento em função da temperatura média esperada para o local da obra ao longo do ano. Dosar a mistura para satisfazer esta condição na obra é essencial para que o projeto tenha sucesso.
4) Adotar uma estrutura inicial, definindo as espessuras e tentativas de cada camada com os materiais disponíveis.
5) Calcular o estado de tensões e deformações atuantes na estrutura carregada com o eixo-padrão. Em geral, os parâmetros de verificação críticos são: a deflexão prevista na superfície, a deformação de tração no revestimento (ou a tensão de tração ou a diferença de tensões) e a tensão ou deformação de compressão vertical no subleito. Escolher o programa de cálculo de tensões de acordo com os resultados dos ensaios dinâmicos dos materiais (elástico linear ou não linear).
6) Comparar os valores calculados de deformação e tensões com os critérios de ruptura estabelecidos em função do número N de projeto (curvas de fadiga, deflexão admissível e tensão ou deformação de compressão admissível no subleito) que definem a vida útil do pavimento dimensionado
7) Verificar o afundamento de trilha de roda, previsto o número N de projeto, considerando-se a contribuição de todas as camadas e comparar com os valores admissíveis. Este é mais um critério de vida verificado após os demais.
8) Se os critérios previstos em 6 e 7 forem atendidos, considera-se o pavimento dimensionado. Caso algum dos critérios não for atendido, deve-se alterar as espessuras e refazer os cálculos de tensões e deformações e a comparação com os limites exigidos para o nível de tráfego de projeto.

Fonte: Adaptado de Medina e Motta (2015) - Adaptado

A ordenação anterior é a mesma utilizada no programa. Para utilizá-lo, o usuário deve cumprir os primeiros três passos e inserir informações que caracterizem o problema. O passo seguinte é opcional ao usuário e pode ser utilizado em uma situação de reforço do pavimento, por exemplo. A partir das informações de entrada no sistema, ele fará o dimensionamento das camadas. Segundo o IPR (2020b), caso o critério de dimensionamento não seja atendido, o programa irá fazer o acréscimo gradual, em intervalos fixos nas camadas. Supondo-se o princípio de funcionamento semelhante ao que ocorria com o SisPav, é apresentado o fluxograma na Figura 10.

Figura 10 - Fluxograma do método de dimensionamento de pavimentos asfálticos - SisPav



Fonte: Franco (2007)

O emprego de *softwares* encontra-se como uma tendência mundial de uso desse tipo de metodologia. Desde o ano de 2005, Medina e Motta (2015), indicavam que esse era o caminho a ser seguido e que a partir de um sistema ‘fechado’, a partir apenas da entrada de dados e da correta utilização dos critérios de ruptura, seria possível realizar o dimensionamento do pavimento de maneira adequada.

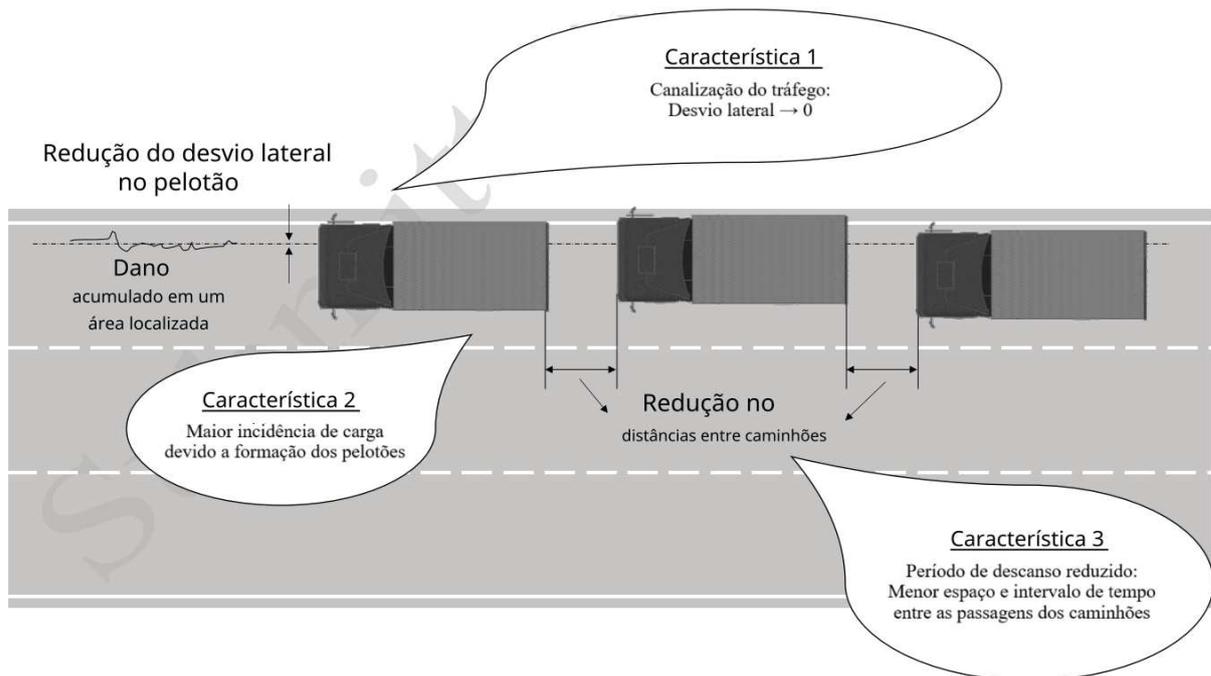
Além disso, foram criadas algumas normas para a realização de ensaios dos materiais. No país, existe a norma DNIT 178/2018 - PRO (Pavimentação asfáltica - Preparação de corpos de prova para ensaios mecânicos usando compactador giratório Superpave ou Marshall - Procedimento). Com ela, é possível realizar ensaios de performance mecânica, como o de fadiga (nível de deformação permanente), resistência a tração e o módulo de resiliência (DNIT, 2018), contudo ainda está em fase de desenvolvimento uma norma específica para o ensaio de fadiga para a Brita Graduada Tratada com Cimento, conhecida por BGTC (IPR, 2020b).

4 IMPACTO DOS VEÍCULOS AUTÔNOMOS NA INFRAESTRUTURA VIÁRIA

A introdução dos veículos autônomos produzirá efeitos na interação entre a frota e o pavimento. Segundo Leiva-Padilla *et al.* (2022), algumas das implicações causadas por essa influência podem ser resumidas quanto à capacidade de a frota de VAs operar de maneira mais concentrada no pavimento devido ao menor deslocamento horizontal na pista, à capacidade em se deslocarem em distâncias menores entre si (formação de pelotão) e à melhor eficiência na condição de operação quanto a velocidade e aceleração. Steyn e Maina (2019) resumiram essas consequências sofridas pelo pavimento, conforme o exposto a seguir e a Figura 11 ilustra como elas surgem na estrutura.

- Reaplicação de carga mais focada e, portanto, aumento da deformação permanente esperada (rotina) e fissuração longitudinal. Isso pode, até certo ponto, ser contornado através da aplicação de um padrão de deslocamento nas operações VA para distribuir as cargas dos veículos por uma largura maior da estrada.
- Velocidades operacionais e velocidade de operação do veículo afetam o tempo de contato entre a carga e os materiais betuminosos da superfície da estrada. Maior consistência nessas velocidades significa que o projeto de revestimentos betuminosos pode ser otimizado para sensibilidade a frequências de carga específicas.
- Aceleração/desaceleração mais consistentes, gerenciadas através do potencial VA, levam à redução das tensões superficiais longitudinais aplicadas à superfície betuminosa.
- Menos ações de parar/acelerar nos cruzamentos e melhor controle do fluxo VA através de áreas urbanas, combinado com melhor controle de semáforos para reduzir a incidência de veículos parando em cruzamentos gerenciados. Isso provoca tensões longitudinais mais baixas nos materiais de revestimento betuminoso, resultando em menor deformação permanente.
- Aumento da condução por VA à noite - a temperatura dos materiais de revestimento betuminoso é mais baixa durante a noite, resultando numa maior rigidez para estes materiais, maior capacidade de suporte e expectativa de maior vida útil do pavimento.

Figura 11 - Impacto dos caminhões em pelotões nos pavimentos



Fonte: Adaptado de Leiva-Padilla *et al.* (2022)

Segundo Rana e Hossain (2021), a principal diferença entre os VAs e os Veículos Operados por Humanos (VOHs) é a distribuição da carga da roda na faixa de percurso. Em virtude da tendência de centralizar a movimentação no centro da pista, há uma maior canalização do tráfego em um único ponto. Conseqüentemente, há uma maior predisposição para formação dos danos devido a esse impacto por conta dessa menor dispersão. Em função dessa proposição, de acordo com Chen *et al.* (2019), espera-se que os desgastes como a fadiga e a deformação permanente aumentem consideravelmente, afetando o desempenho do pavimento.

Ainda de acordo com Chen *et al.* (2019), a profundidade do sulco está significativamente correlacionada com o número de cargas axiais padrão. Isso ocorre porque segundo o *Highway Performance Assessment Standards* (JTG H20-2007 *apud* Chen *et al.* (2019)), o desempenho do pavimento começa a diminuir quando a profundidade do sulco atinge 6mm. Além disso, as diretrizes estabelecem um valor de 15 mm para essa profundidade, que deve ser adotado para indicar possibilidade de criação de perigo, sem que ocorra distinção do trecho da estrada e da velocidade do veículo (Zheng *et al.*, 2021). Para Steyn e Maina (2019), como a infraestrutura atual está defasada devido ao fato de não ter sido construída e mantida para essa nova população de veículos, a inserção dos VAs na frota atual irá impactar diretamente nas camadas da superfície e da base.

Conforme o DNIT (2003), os novos sulcos terão o formato das trilhas de rodas por possuírem comprimento maior que 6m. Além disso, esse tipo de afundamento pode ser classificado como plástico. Nesse caso, ele se difere do afundamento ocasionado por consolidação diferencial de uma ou mais camadas do pavimento ou subleito que não provoca solevamento, ou seja, não provoca a elevação da superfície do pavimento. No caso do afundamento plástico, representado Figura 12, ele possui origem na fluência, que ocorre quando a carga é aplicada durante um maior tempo do que o esperado ou há submissão do material a altas temperaturas em uma ou mais camadas, provocando o solevamento.

Figura 12 - Afundamento de Trilha de Roda



Fonte: Adaptado de DNIT (2003)

Por fim, é possível confrontar alguns dos prós e contras das consequências da adoção dos veículos autônomos para o pavimento, a partir do Quadro 5.

Quadro 5 - Resumo dos prós e contras da introdução dos VAs

Implicação	Prós	Contras
Concentração da aplicação das cargas (maior controle lateral)	Possível aumento quanto à segurança	Possível aumento das deformações permanentes
Menores distâncias entre os veículos	Economia de combustível (efeito pelotão)	Menor tempo de descanso para o pavimento
Otimização nas operações de tráfego devido às maiores velocidades permitidas	Redução no tempo de viagem	Possível aumento das tensões dinâmicas em curvas, interseções e zonas de frenagem
Aceleração e desaceleração mais consistentes	Redução nas tensões longitudinais (tração)	-
Aumento da condução, por VA, no período da noite	Melhor distribuição da frota durante o período das 24h	Menor tempo de descanso para o pavimento

Fonte: O autor

4.1 AVALIAÇÃO DAS IMPLICAÇÕES QUANTO AOS CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO

Para Noorvand, Karnati e Underwood (2017), é fundamental fazer a caracterização quanto ao desempenho do pavimento para que se possa obter informações adicionais aos critérios de dimensionamento. A partir dela, é possível prever quais materiais utilizar para que o concreto asfáltico suporte as cargas necessárias pelo tempo seu de vida útil. Segundo os autores, essa previsão pode ser feita em três etapas.

Na primeira delas, a partir das combinações do impacto das cargas dos eixos nos pontos específicos do pavimento, são feitas previsões das tensões e deformações que o material irá sofrer utilizando modelos elásticos, durante o seu tempo de vida útil. Para o caso de danos por fadiga, as tensões de interesse são as tensões de tração que acontecem no fundo da camada de concreto asfáltico, ao passo que para os prejuízos originários das deformações permanentes, são observadas as tensões verticais. A partir das tensões obtidas, são estimados os danos de trincas e trilhas de rodas, provocados por elas.

De acordo com Noorvand, Karnati e Underwood (2017), o dano por fadiga é estimado a partir da combinação do tipo e número de eixos, localização da roda e das variações sazonais. Esse valor é determinado usando a razão do número de ciclos aplicados naquela combinação pelo número de ciclos que resultam em falha do pavimento se apenas aquela única combinação fosse aplicada, conforme indica a Equação 1.

$$D_i = \frac{n_i}{N_i} \quad (1)$$

Onde:

- D_i representa o dano durante a combinação de interesse i ;
- n_i represente o número de aplicações de carga que ocorrem durante a combinação i ;
- N_i representa o número de repetições de cargas admissíveis nas condições prevalecentes na combinação i ;

Sendo que o N_i , pode ser determinado conforme a Equação 2.

$$N_i = 0,2091 \times \beta_1 \times \left(\frac{\frac{Va}{Va + Vb} - 0,69}{0,000398 + \frac{0,003602}{1 + \exp(11,02 - 3,49 \times h_{ac})}} \right) \times \left(\frac{1}{\varepsilon_{t,i}} \right)^{\beta_2 \times 3,9492} \times \left(\frac{1}{E} \right)^{\beta_3 \times 1,281} \quad (2)$$

Onde:

- $\varepsilon_{t,i}$ representa a tensão de tração em $x = 0$ quando a roda está localizada na combinação;
- E representa o módulo de elasticidade do concreto asfáltico;
- V_a representa o índice de vazios de ar (%);
- V_b representa o teor de ligante asfáltico (%);
- h_{ac} representa a espessura da camada de concreto asfáltico;
- β_1, β_2 e β_3 representa os fatores locais de calibração;

Uma vez estimados os arranjos, utiliza-se da regra de Miner, a partir da Equação 3, para realizar as combinações entre eles. Ela consiste na expressão em que “se reconhece existir uma razão da tensão de tração na flexão para a ruptura, abaixo da qual o concreto pode resistir indefinidamente, nas condições de solicitação do ensaio” (Medina e Motta, 2015, p. 325).

$$Dano\ total = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^o \frac{n_{jkl}}{N_{jkl}} \quad (3)$$

- j, k, l representam as diferentes categorias, incluindo diferentes incrementos de tempo, desvio de tráfego e classe de caminhão sobre a qual é feito o somatório dos danos;

A segunda etapa consiste na análise do impacto gerado pelas trilhas de rodas. Nela, determina-se o valor desse efeito a partir do acúmulo de deformações plásticas para cada faixa de profundidade (variando de 12,5mm até 25mm). Os autores utilizaram a metodologia indicada no guia norte-americano para dimensionamento ME de pavimentos (*Guide for Mechanistic-Empirical Design of New Rehabilitated Pavement Structures* (2004) *apud* Noorvand, Karnati e Underwood (2017)). Neste, o cálculo para esse gênero de dano utiliza funções semi-empíricas, indicadas nas Equações de 4 a 7, e se baseia na regra de dano-incremental, em que cada combinação de carregamento é sequencialmente contabilizada quanto ao impacto nas camadas granulares e asfálticas.

$$\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_r} = k_z \times \beta_{r1} \times 10^{-3,3541} \times T^{1,5606 \times \beta_{r2}} \times N^{0,479 \times \beta_{r3}} \quad (4)$$

$$K_z = (C_1 + C_2 \times depth) \times 0,328196^{depth} \quad (5)$$

$$C_1 = -0,1039h_{ac}^2 - 17,34 \quad (6)$$

$$C_2 = 0,0172h_{ac}^2 - 1,7331h_{ac} + 27,428 \quad (7)$$

Onde

- ε_p representa a deformação plástica acumulada em N repetições de cargas;
- ε_r representa a deformação vertical do material asfáltico prevista pelo modelo elástico em camadas;
- T representa a temperatura no pavimento;
- N representa o número de eixos equivalentes;

- β_1, β_2 e β_3 representa os fatores locais de calibração;

Nesse processo, é preciso utilizar o conceito de eixos equivalentes. Essa necessidade provém do fato de o dano por trilha de rodas ser contínuo. Consequentemente, o incremento da deformação plástica (não linear) será analisado em função da deformação elástica (que é linear), sendo induzido pelo impacto do caminhão e dos veículos que passaram anteriormente. Como o grupo que passou anteriormente pode possuir diversas características diferentes, é feita a equivalência entre esses veículos, a partir da Equação 8.

$$N_{eq} = \left(\frac{\varepsilon_{p,j-1}}{\varepsilon_{p,j} \times K_z \times \beta_{r1} \times 10^{-3,3541} \times T^{1,5606 \times \beta_{r3}}} \right)^{\frac{1}{0,4791 \times \beta_{r3}}} \quad (8)$$

A partir disso, para o cálculo da deformação plástica que existe após a passagem do grupo de caminhões, pode-se usar a Equação 9, em que ΔN representa o número de caminhões que estão nesse grupo. Portanto, a partir da equação, é possível avaliar o impacto do sulco do pavimento, dada a ordem de aplicação das cargas, por eixo padrão.

$$\varepsilon_p = [k_z \times \beta_{r1} \times 10^{-3,3541} \times T^{1,5606 \times \beta_{r2}} \times (\Delta N + N_{eq})^{0,479 \times \beta_{r3}}] \times \varepsilon_r \quad (9)$$

Nesse momento, segundo Souza (2021), o método desenvolvido no Brasil considera a deformação permanente total equivalente à soma do impacto que ocorre apenas nas camadas granulares. Para que se possa considerar as implicações na camada asfáltica, utiliza-se da verificação das propriedades mecânicas da mistura, através do parâmetro *Flow Number* (FN). Segundo a autora, esse valor é determinado através do ensaio uniaxial de carga repetida, que é recomendado particularmente para complementar o *software* MeDiNa.

Por fim, a terceira etapa da previsão é relacionar o valor do dano ao desgaste do pavimento. Para os danos por fadiga, essa determinação pode ser efetuada a partir da Equação 10. Com ela, é possível prever, em porcentagem da superfície, a área total da pista que será afetada pelas trincas por fadiga que ocorrem de baixo para cima.

$$FC_{bottom} = \left(\frac{6000}{1 + e^{(C'_1 \times C'_2 + C''_1 \times C''_2 \times \log(D \times 100))}} \right) \times \left(\frac{1}{60} \right) \quad (10)$$

Onde

- FC_{bottom} representa a trinca de fadiga de baixo para cima em porcentagem da área da pista
- D representa o dano de fadiga de baixo para cima
- $C'_1 = 1,0$
- $C'_2 = 1,0$

As outras constantes são determinadas pelas equações 11 e 12.

$$C_1'' = -2 \times C_2' \quad (11)$$

$$C_2'' = -2,40874 - 39,748 \times (1 + h_{ac})^{-2,856} \quad (12)$$

Para os danos oriundos dos sulcos, a função de transferência é a Equação 13. Nela, são usados o produto acumulado da profundidade da camada e da deformação plástica sofrida por ela.

$$PD = \sum_{m=1}^n \varepsilon_p^i h^m \quad (13)$$

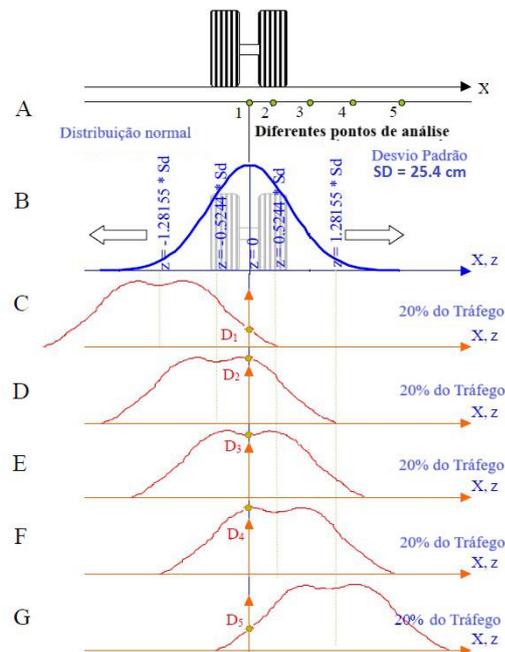
Onde

- PD representa a deformação permanente do pavimento;
- n representa o número de subcamadas;
- ε_p^i representa a deformação plástica total na subcamada;
- h_i representa a espessura da subcamada m ;

4.2 APLICAÇÃO DO IMPACTO DE VEÍCULOS AUTÔNOMOS NO PAVIMENTO

Abordagens diferentes podem ser elaboradas para avaliar o impacto dos veículos autônomos no ponto específico do pavimento. Uma delas é a utilizada pelo *software* Mechanistic Empirical Pavement Design Guide (MEPDG). Segundo Georgouli e Plati (2022), o princípio básico de funcionamento é que a posição onde a roda está localizada com uma maior frequência, é a mais crítica. Contudo, mesmo quando a roda não está nesse ponto de maior impacto, ainda existe uma influência nos pontos adjacentes devido às deformações induzidas, como é possível observar na Figura 13.

Figura 13 - Consideração do desvio da roda



Fonte: NCHRP II-1 (2004) *apud* Noorvand, Karnati e Underwood (2017)

Ainda segundo Georgouli e Plati (2022), nesse modelo, a área sob a curva é dividida em cinco partes, cada um representando o local por onde 20% do número total de caminhões irão passar. A coordenada x representa onde está ocorrendo o impacto na pista. Esse valor de x pode ser determinado multiplicando-se o desvio normal padrão z , conforme indicado na Figura 13, pelo desvio padrão (*wander*). O último corresponde aos valores de 10%, 30%, 50%, 70% e 90% do dano provocado pela distribuição dos 20%. Nesse modelo, supõe-se que as deformações se desenvolvem mesmo em um local com coordenada $x = 0$, em que essa posição é o centro dos dois pneus.

5 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DOS PAVIMENTOS DEVIDO AO IMPACTO DA OPERAÇÃO DE VEÍCULOS AUTÔNOMOS

5.1 OS PRIMEIROS ESTUDOS

Para melhor avaliação dos impactos provocados pela movimentação dos veículos autônomos, diversos estudos foram realizados para dimensioná-los. Responsáveis por um dos primeiros trabalhos acerca do tema, Noorvand, Karnati e Underwood (2017) utilizaram os conceitos do método mecanístico empírico. Com isso, foi possível quantificar os efeitos positivos e negativos nas estruturas rodoviárias, a partir de combinações que envolviam caminhões autônomos e não autônomos em alguns cenários.

O exercício desenvolvido pelos autores foi realizado a partir do uso do *software* MEPDG, programa que se utiliza da regra de Miner. Neste, os dados de entrada consistem em informações a respeito do clima, tráfego, estrutura e materiais. Além disso, a fim de creditar maior confiabilidade ao estudo, levou-se em consideração o fato de que quando há duas faixas de rodagem, os caminhões operados por humanos se posicionam desproporcionalmente em uma delas (até 90%). Geralmente, essa implicação afeta inclusive no momento do dimensionamento, já que a outra faixa será menos requisitada. Estradas com três ou quatro faixas tendem a diminuir esse efeito entre 60% e 80%.

Sob essas condições, o primeiro cenário elaborado por Noorvand, Karnati e Underwood (2017) foi o de referência, sem caminhões autônomos. O segundo foi o de integração, em que veículos autônomos e não autônomos utilizam a mesma faixa, ao mesmo tempo. Por fim, o terceiro foi o de segregação, em que os dois modelos possuem faixas exclusivas. Ademais, os dois últimos cenários foram subdivididos em situações que levam em consideração a distribuição por faixa de rodagem. Para o 2a e 3a, os VAs assumem a mesma distribuição dos VOHs. Para o 2b e 3b, eles ocupariam mais de uma faixa sem levar em conta a recomendação de tráfego pesado pela direita. Por fim, os autores ainda optaram por simular todos esses cenários para três módulos de elasticidade: 700, 2500 e 6000 kPa.

A partir dos resultados, conclusões importantes foram obtidas. As camadas de concreto asfáltico com menor módulo de elasticidade apresentaram melhor desempenho geral, independente do tipo de distribuição quando comparadas com as camadas de concreto asfáltico mais rígidas.

Com relação aos danos no pavimento, por conta do traçado único, o impacto causado pelos VAs foi maior, provocando maior risco de fadiga e deformação. Contudo, nos cenários em que houve uma melhor distribuição dos autônomos nas pistas (2b e 3b), ocorreu uma melhora no desempenho do pavimento e conseqüentemente, pode-se inclusive diminuir a espessura necessária das faixas de suporte para atender a essa demanda. Por fim, no campo da camada do pavimento e do custo inicial da construção, a análise de todos os cenários, segregados e integrados sugere uma implantação benéfica da primeira possibilidade (segregada), tanto em maior quanto em menor porcentagem de incorporação de VAs.

No estudo de Chen *et al.* (2019), os autores identificaram quatro cenários possíveis para a movimentação dos VAs ocorrer no tráfego rodoviário. Portanto, pressupõe-se que foi identificado mais módulos controle do que no estudo anterior que se limitou o posicionamento nas faixas com deslocamento zero (centralizado) e uniforme, apenas.

O primeiro cenário (Modo 0) se caracteriza pelo movimento dos caminhões autônomos de maneira centralizada, similar ao movimento de um trem. Essa proposição é elaborada por motivos de segurança, a fim de obter um traçado mais confiável. Essa hipótese foi utilizada como referência para análise dos outros cenários. Na segunda hipótese, o Modo 1, utilizou como referência uma distribuição normal, que conferiu um maior grau de divisão da carga na pista. O Modo 2 se caracterizaria pelo uso de marcações visuais no pavimento, conseqüentemente, utilizou-se uma curva gaussiana de pico duplo para descrever essa distribuição. Por fim, o Modo 3 considerou que a difusão de tensões da carga no pavimento e a largura do pavimento ainda precisam ser resolvidas, trata-se de um modelo uniforme de duas seções.

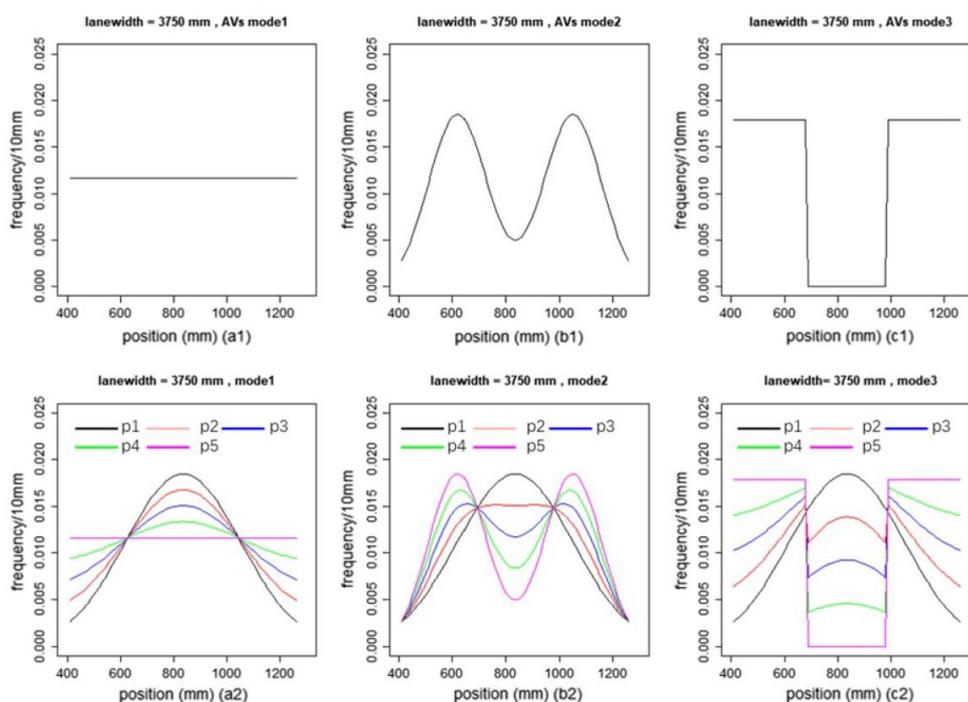
Como metodologia avaliativa, o autor utilizou o software ABAQUS para realizar uma simulação por elementos finitos da passagem de 200.000 veículos. Para caracterizar a deformação por fluência, utilizou-se da lei empírica de Bailey-Norton, demonstrada na Equação 14. A função foi utilizada levando-se em conta a temperatura, o tempo e a tensão. Conseqüentemente, q é a tensão desviadora, t é o tempo de carregamento e os parâmetros A , n e m são para três camadas superficiais em determinadas temperaturas.

$$\varepsilon_{cr} = Aq^n t^m \quad (14)$$

Na Figura 14, é possível observar a curva que descreve cada um dos cenários em a1, b1 e c1. Além disso, o autor utilizou as curvas p1, p2, p3, p4 e p5 para descrever o movimento executado

pelos VAs na curva e quantificá-los de maneira integrada aos cenários. A curva p1, se refere a curva normal executada por VOHs, enquanto a p5 representa o cenário de aplicação. As curvas p2, p3 e p5 se referem à proporção dos caminhões autônomos.

Figura 14 - Frequência da carga axial padrão



Fonte: Chen *et al.* (2019)

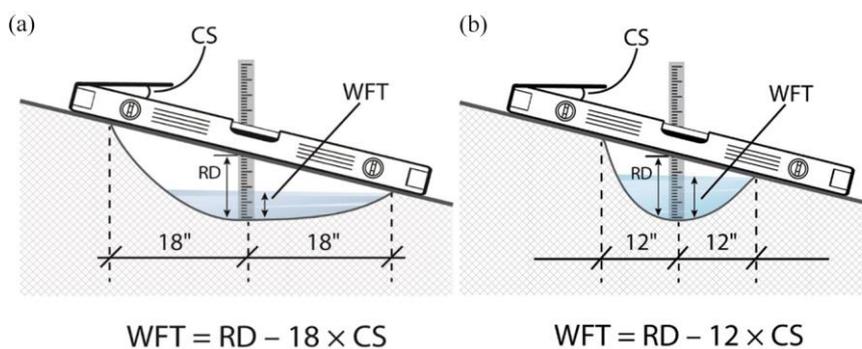
A partir das simulações, foi possível concluir que o aumento significativo no acúmulo de danos por fadiga no modo 0 se contrapõe com os modos 1, 2 e 3, diminuindo em quase 1,56 anos a vida útil do pavimento. Além disso, a partir da regra de Miner e da simulação de difusões de tensões, concluiu-se que nos outros cenários (1, 2 e 3), o processo de dano é mais lento e ocorre de forma proporcional ao aumento do volume de VAs. Entre os modelos 1, 2 e 3, o terceiro é o que obtém melhores resultados. Para uma frota completa de veículos autônomos (100%), ocorre uma diminuição de até 35% dos danos por fadiga quando comparada com uma frota completa de veículos operados por humanos. Em compensação, o dano pode ser até 2,7 vezes pior quando o cenário 0 é comparado com a situação da frota de VOHs. Ademais, no modo 3 também foi possível observar uma melhor distribuição dos danos na faixa, efeito semelhante ao que ocorre com o modo 1. Em compensação, o modo 0 apresenta maior concentração deles. Por fim, observa-se que, quando a frota de veículos autônomos é maior do que 50%, se for utilizada a implantação uniforme de distribuição dos VAs na faixa de rolamento, dividindo-a em duas seções distintas, é possível adiar a necessidade de manutenção em até 2,3 anos.

5.2 ANÁLISE QUANTO À PROFUNDIDADE DOS SULCOS

Em contrapartida, o trabalho de Zhou *et al.* (2019) identificou apenas os cenários em que a frota de veículos é completamente autônoma ou não. O objetivo foi identificar as consequências que os sulcos dos pavimentos podem provocar na estabilidade dos VAs em relação à passagem desses veículos em situações que provocam o risco de aquaplanagem. Segundo os autores, esse fenômeno consiste na completa separação do contato entre o pneu e o pavimento, devido à presença de um fluido. Fatores como a velocidade do veículo, a pressão dos pneus, a geometria da estrada e a espessura da película de água podem influenciar essa ocorrência.

Para caracterizar os problemas de trincas e deformações provocados no pavimento, foi utilizado o *Texas Mechanistic-Empirical Flexible Pavement Design* (TxME). Enquanto isso, para previsão de velocidades de aquaplanagem, utilizou-se um modelo de equações combinadas que levam em consideração a espessura do filme de água (chamado no artigo de *Water Film Thickness* ou WFT). Esse WTF se associa com a profundidade do sulco (*Rutting Depth* ou RD) do pavimento através da inclinação (*Cross Slope* ou CS) da via, como é possível observar na Figura 15.

Figura 15 - Relação entre RD, CS e WFT para: (a) tráfego regular de caminhões e (b) carros autônomos



Fonte: Zhou *et al.* (2019)

Com relação às trincas, o cenário em que há apenas autônomos reduziu o tempo de vida útil em 20% para o surgimento delas, enquanto que para o aparecimento de sulcos, essa situação leva um tempo 32% menor para iniciar o processo de formação dessas deformações permanentes. Em função desses resultados de aumento da velocidade para o surgimento de sulcos, foi calculada a profundidade mínima para que os veículos de passeio sofressem com as consequências da aquaplanagem. O efeito ocorre mais comumente com esse tipo de veículo

devido ao fato de os seus pneus serem menores e a sua carroceria mais leve, quando confrontados aos caminhões.

Comparando os dois cenários, quando há apenas autônomos, em todas as velocidades e inclinações o RD crítico é menor nessa situação, o que obrigaria os VAs a diminuir sua velocidade em função da segurança. Consequentemente, os autores propuseram o uso da distribuição normal para amenizar esses efeitos provocados pelos VAs no pavimento. A partir disso, quando se compara o RD crítico dessa nova situação com os dois cenários anteriores, o valor é maior inclusive do que quando há motoristas. Isso garante, portanto, maior vida útil ao pavimento e segurança aos passageiros.

Zheng *et al.* (2021) focou no impacto que o pavimento que sofreu com deformações permanentes por parte dos VAs terá sobre a estabilidade desses veículos em diferentes profundidades de sulcos (1 cm, 1,5 cm, 2 cm, 2,5 cm e 3 cm). Para isso, a partir de um modelo de carro popular na China, foi feita a utilização do *software* Simulink (em MATLAB) para compilar o subsistema de mudança de faixa para VAs conectada à interface CarSim para realizar simulações. Dentre as conclusões, é possível destacar o fato de que profundidades com 1,5 cm já são o suficiente para atrapalhar o conforto dos passageiros. Em condições de direção autônoma, se esse valor chegar a 2,5 cm, o ângulo de inclinação lateral do veículo ultrapassa a força centrífuga inercial. Consequentemente, devido à ausência de intervenção humana, o veículo pode ter dificuldades para corrigir a situação de maneira efetiva, aumentando o risco de acidentes em situações de manobra ou curva.

5.3 OUTROS MODELOS DE ABORDAGEM

Retornando ao impacto dos VAs no pavimento, o trabalho de Huang, Onifade e Birgisson (2021), utilizou a metodologia Monte-Carlo para realizar a avaliação do efeito provocado pelos veículos na vida útil da infraestrutura. A análise foi a respeito do que eles chamaram de *Top-Down Cracking* (TDC), que seria a formação de trincas de cima para baixo, contrapondo-se, portanto, à metodologia citada na terceira etapa de análise do impacto dos VAs no pavimento, em que as trincas surgem de baixo para cima (Noorvand; Karnati; Underwood, 2017).

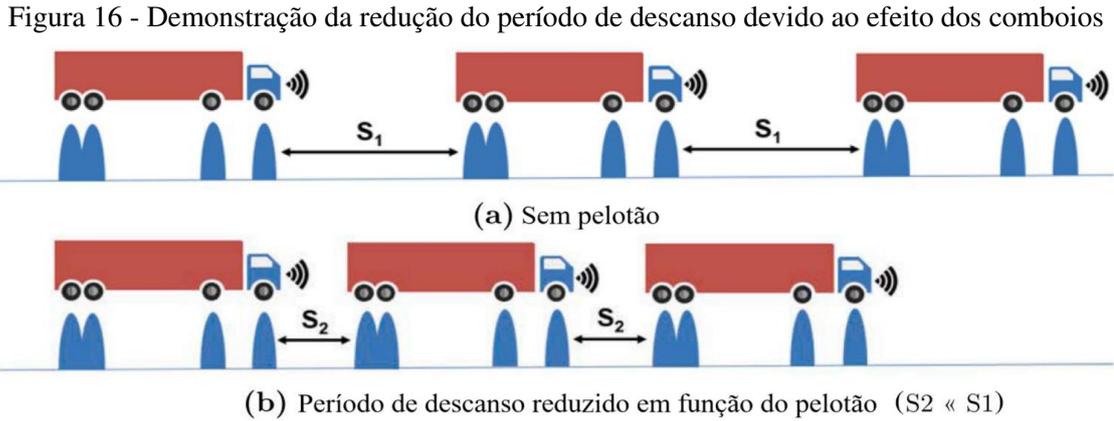
Sobre a técnica utilizada, a abordagem Monte-Carlo se contrasta com o método tradicional utilizado pelo MEPDG, que utiliza uma distribuição normal para considerar o posicionamento

dos veículos no pavimento. Por um lado, no procedimento convencional as cargas são sempre aplicadas no centro da trajetória da roda, enquanto que no novo processo permite-se o desvio lateral das cargas, de acordo com uma distribuição normal designada. Consequentemente, isso introduz um elemento probabilístico na modelagem dos efeitos do tráfego do pavimento.

Ao cumprir o objetivo de calibração da estrutura de análise, Huang, Onifade e Birgisson (2021) fizeram simulações para avaliar o desempenho do pavimento do estado da Flórida ao longo do seu tempo de vida útil. Esse valor mostrou uma diminuição desse desempenho devido ao impacto dos VAs que variou de 7,8% até 17,2% para vias de alto e médio tráfego, e de 15,1% até 21,9% para as vias de baixo tráfego. Apesar de a aplicação ter se restringido apenas ao cenário extremos de frota integral de veículos autônomos ou não, os resultados demonstram a indicação de que as rodovias de baixo tráfego (rodovias estaduais daquela região) possuem maior sensibilidade ao impacto dos VAs.

No estudo de Gungor e Al-Qadi (2020a), os autores criaram e propuseram o uso do *framework* Wander-2D para fazer controle da posição dos veículos autônomos dentro da via. Por ser uma abordagem analítica, esse tipo de estudo utiliza o uso de distribuições truncadas, permitindo considerar os efeitos de algumas das limitações encontradas na metodologia adotada pelo MEPDG, como a possibilidade de alterar a largura da pista e a distância dos caminhões para a inspeção. Além disso, segundo os autores, essa perspectiva se torna mais atraente por não ser tão onerosa financeiramente quanto à abordagem Monte-Carlo, além de requerer menos amostras para realização.

De acordo com Gungor *et al.* (2020), o conceito do Wander-2D serve como uma ferramenta complementar a qualquer abordagem analítica de projeto, incluindo o MEPDG, que foi utilizado para realização dos ensaios. A finalidade foi desenvolver fatores ajustáveis que modificam o dano provocado por VAs quando comparados aos VOHs, como a diminuição do tempo de descanso que o pavimento possui devido a ação dos comboios conforme representado na Figura 16.



Fonte: Adaptado de Gungor *et al.* (2020)

Além disso, de acordo com Gungor e Al-Qadi (2020b), outro ponto importante do *framework* é o fato de as equações iniciais se tornarem muito complexas para fazer o armazenamento e cálculo de todos esses dados. Por conta disso, o Wander-2D utiliza-se da aproximação de Chebyshev, demonstrada a seguir, na Equação 13. Ela tem a atribuição de associar quaisquer funções limitadas com o nível de precisão desejado.

$$g(y) = \sum_{k=1}^p h_k R_k(y) \quad (15)$$

Onde:

- $g(y)$ representa a função a ser aproximada, ou seja, é o dano acumulado na i -ésima etapa.
- h_k representa os coeficientes de Chebyshev
- $R_k(y)$ representa os polinômios de Chebyshev (determinado pela eq 16)

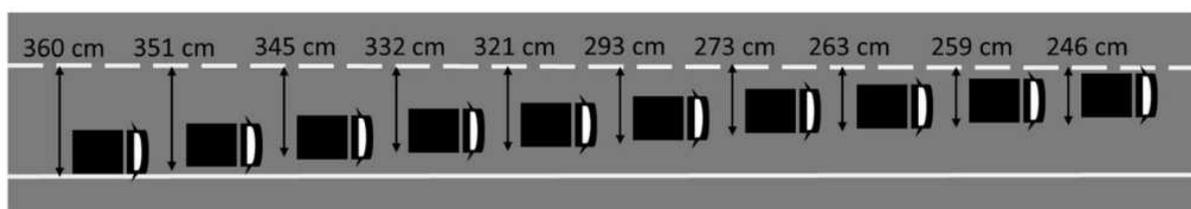
$$R_k(y) = \cos(k \cos^{-1}(y)) \quad (16)$$

A partir desse artifício, Gungor *et al.* (2020) realizou uma simulação para análise. Um dos conceitos abordados foi o de acrescentar efeitos aerodinâmicos. Segundo os autores, devido à maior aproximação entre os veículos, ocorre o fenômeno de redução do arrasto. Essa redução é afetada em função da posição relativa dos caminhões adjacentes e diminui à medida que os veículos são colocados mais afastados entre si ou modificam o alinhamento. Em função disso, utilizou-se o conceito de razão de arrasto, valor esse que aumenta quando os veículos estão próximos e alinhados, mas diminui se ocorrer o desalinhamento. O objetivo da simulação era o de estabelecer um ponto ótimo para divisão dos custos da operação de transporte. Consequentemente, procurou-se obter um ponto de equilíbrio nos gastos de combustível (devido ao arrasto) e deterioração da infraestrutura, repartindo igualmente essas despesas entre usuários e concessionárias, respectivamente.

Para a realização do ensaio, foram simulados pelotões que variaram entre 2 e 10 caminhões, limitando o espaçamento deles em pelo menos 3m. Segundo os autores, três algoritmos de otimização, presentes no MATLAB foram utilizados, são eles: *Pattern-Search* (PS), *Genetic-Algorithm* (GA) e *Particle-Swarm optimization* (SW). O último foi o que obteve melhores resultados, provocando maior ganho líquido todos tamanhos de pelotão, demonstrando ser o ideal para essa finalidade, apesar do PS oferecer menores custos computacionais e o GA oferecer resultados próximos ao SW.

A partir do estudo, descobriu-se que o valor ótimo para esse espaçamento é o de 3,3m. Além disso, a partir da proposta de desalinhamento dos comboios, conforme representado na Figura 17, a fim de balancear os custos entre concessionárias e usuários, verificou-se que enquanto o ganho líquido para as primeiras será positivo, para o segundo será sempre negativo devido ao aumento do arrasto aerodinâmico. Considerando-se um período de análise de 45 anos, a proposta de desalinhamento do pelotão reduz o custo total relativo à manutenção do pavimento em 9%. Segundo os autores, esse valor pode aumentar de acordo com o número de caminhões no pelotão.

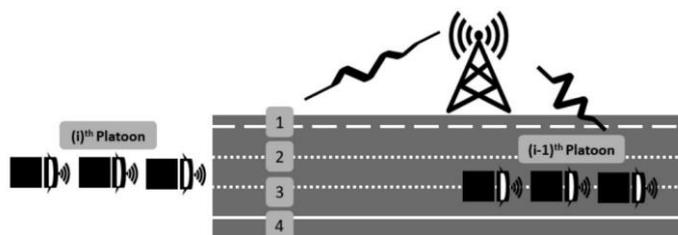
Figura 17 - Alinhamento ótimo para o pelotão com 10 caminhões



Fonte: Gungor *et al.* (2020)

Ainda utilizando esses conceitos, Gungor e Al-Qadi (2020b) utilizaram de outra distribuição do platooning, considerando que os veículos seriam autônomos e conectados. Nessa análise, o objetivo era diminuir o impacto do comboio no pavimento de maneira que ocorra um ajuste externo deles, sem alterar o alinhamento da frota, como pode ser observado na Figura 18. Conseqüentemente, a partir desse modo, os autores aumentam o tempo de descanso da infraestrutura. Com o estudo de caso realizado, a estratégia de controle da proposta atingiu uma redução do impacto de até 50% no custo do ciclo de vida do pavimento.

Figura 18 - Demonstração da solução proposta



Gungor e Al-Qadi (2020b)

O trabalho de Rana e Hossain (2021) analisou o desempenho do pavimento através do *software* AASHTOWare. O procedimento de análise é o mesmo utilizado pelo MEPDG e citado na seção anterior. Foram propostos três cenários iniciais em que os VAs estão em vias segregadas, ou em vias compartilhadas com os VOHs. Quando ocorre a divisão das estradas entre os dois tipos de veículos, as proporções analisadas entre os autônomos e os operados por humanos foi diversificada. Além disso, dentro dessas situações, modifica-se a característica do movimento da frota, ou seja, sua distribuição no pavimento (canalizados ou em distribuição normal, etc.). Por fim, devido ao fato de os VAs não requererem necessariamente da presença de um condutor, as simulações também foram realizadas aplicando efeitos do período noturno, momento em que a temperatura é menor. Conseqüentemente, foi feita uma segmentação do dia em três partes.

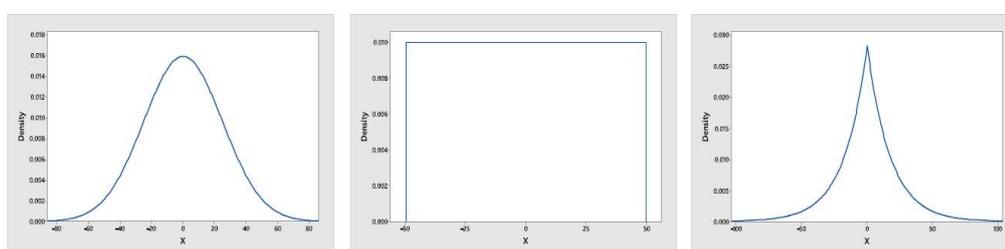
Os resultados mostraram que, quando ocorre a canalização do movimento dos VAs, há um aumento de 1,17 vezes na chance de aparecer trincas e 2,3 vezes para ocorrência de trilhas de roda, quando se compara esse cenário com o dos VOHs, o que vai de encontro com os resultados dos estudos anteriores. Contudo, a apuração se diferencia quando se compara o uso de veículos em situação de segregação com o cenário integrado. Nesse estudo, os números se mostraram menos impactantes ao pavimento quando existe o compartilhamento de faixas entre os modelos com ou sem motorista. Isso porque a diminuição do impacto de sulcos e fissuras chegou a 30,7% e 93,9% no cenário integrado, enquanto que no segregado foi de apenas de apenas 2,62% e 10,8%, respectivamente. Além disso, o estudo verificou que existe uma significativa melhoria na resistência ao desgaste do pavimento quando comparado os resultados noturnos com os diurnos. A diminuição chega a 23,9% em situações de frota integrada e 23,8% quando separadas.

5.4 ESTUDOS MAIS RECENTES

No estudo de Georgouli e Plati (2022), também foram utilizadas as bases do MEPDG. Contudo, ele se diferenciou dos demais por utilizar da distribuição de Laplace, além das distribuições

zero (concentradas no centro do pavimento), normal e uniforme, como mostrado na Figura a seguir, para descrever o percurso dos VAs. Além disso, o autor fez simulações que envolviam a mudança na espessura da camada do pavimento, variando de 8 cm até 20 cm (de 2 cm em 2 cm) e do módulo de rigidez, partindo de 3.000 MPa e indo até 10.000 MPa (de 1.000 Mpa em 1.000 MPa). Ao todo, somaram-se 56 combinações diferentes. Apesar desse valor, os autores ainda duplicaram o número por considerar para a análise, o módulo de elasticidade estático e dinâmico e duplicaram novamente ao considerar as temperaturas de 20°C e 30°C.

Figura 19 - Gráfico de distribuição de probabilidade normal, uniforme e de Laplace, respectivamente



Fonte: Adaptado de Georgouli e Plati (2022)

A partir das simulações, Georgouli e Plati (2022) concluíram que a redução da área trincada e da profundidade dos sulcos foi mais evidente na análise estática. Segundo o autor, isso pode ser explicado devido ao fato de o ensaio do módulo estático ser mais intenso do que o ensaio do módulo dinâmico, o que evidencia que qualquer mudança no padrão de carregamento produzirá um efeito. Além disso, os autores confirmaram o efeito benéfico do uso das distribuições para o percurso dos veículos na vida útil do pavimento com relação ao aparecimento de trincas, sendo que a distribuição uniforme foi a que obteve melhores índices. Esse índice de redução da área trincada para as distribuições normal, uniforme e de Laplace, em relação ao cenário de desvio zero, são, respectivamente: 23,5% (15,25%), 33% (22,4%) e 22,5% (12,5%), dos quais os valores iniciais se referem a análise estática e os que estão entre parênteses a análise dinâmica.

Já os valores de redução da profundidade do sulco, para as distribuições normal, uniforme e de Laplace, são: 29,9% (29,2%), 41,7% (41,1%) e 25,3% (22,3%). Nesse caso, as porcentagens entre parênteses são referentes a análise dinâmica a 20°C. Os resultados dessa análise a 30°C, são: 12,9%, 26,7% e 7,8%, o que demonstra grande variação entre os valores encontrados. Outro ponto importante concluído no trabalho foi que, em geral, a redução na profundidade do sulco depende da espessura da camada e de sua rigidez. Para cada aumento de 2 cm na primeira, a redução que ocorreria nessa altura diminuiu em 3,7% (2,7%), 3,2% (2,7%) e 4% (3,3%) nas

distribuições normal, uniforme e de Laplace, respectivamente. Além disso, o aumento do índice de rigidez em 1000 MPa prejudica em média ponderada, 1,2% (16,3%) para todas as distribuições.

O estudo de Leiva-Padilla *et al.* (2022) utilizou do *software* Visco Route 2.0, que consiste em um programa semi-analítico de modelagem de pavimentos. Essa abordagem permitiu que fossem alterados os seguintes parâmetros: intervalo de tempo entre os VAs, número de caminhões do pelotão, distribuição da frota no pavimento, nível de carregamento e velocidade dos veículos além da temperatura do pavimento.

Conseqüentemente, a simulação utilizou as seguintes combinações: variação de um caminhão solo até três em formação de pelotão com distância equivalente a um intervalo de tempo variando entre 0,5 s, 2,0 s e 3,5 s. Para a variação da posição dos caminhões ao longo da estrada, não ocorreu a utilização de uma distribuição específica. Os autores utilizaram um desvio padrão de ± 20 cm para diferenciar a posição de cada um dos três caminhões pertencentes ao comboio. Além disso, essas informações foram analisadas em duas situações quanto às condições climáticas: verão e inverno. Portanto, a temperatura variou de -25°C até 55°C , sendo modificada em intervalos de 20 km/h. Por fim, a análise foi feita utilizando variações de velocidade dos veículos, estando elas a 40 km/h, 60 km/h, e 80 km/h. As cargas dos eixos foram modificadas entre 40kN, 27,5 kN e 15,7 kN e, por fim, as espessuras utilizadas no cálculo da base foram de 10 cm, 15 cm e 20 cm.

Com as simulações, foi possível concluir inicialmente que, em baixas temperaturas, o pavimento não apresenta grandes modificações nas respostas, seja para caminhões simples ou pelotões. Contudo, para temperaturas acima de 15°C , as deformações geradas no pavimento por parte dos pelotões tendem a aumentar. Para diminuir esse efeito, uma solução proposta pelos autores foi a de aumentar o intervalo de tempo entre a passagem dos caminhões.

Além disso, como a resposta do pavimento é sensível às cargas por eixo, a redução desse valor também pode diminuir essas deformações permanentes. Como exemplo, a redução da carga de 40 kN para 27,5 kN reduziu as deformações produzidas pelo terceiro VA do comboio em cerca de 26%, no cenário em que a temperatura era de 55°C e a distância entre eles era de 0,5 s. Além disso, como era de se esperar, a inclusão do desvio da posição dos caminhões pertencentes ao comboio em 20 cm, pode reduzir as deformações dos três caminhões em até 23%, numa

temperatura de 35°C, com os caminhões viajando a 40 km/h. Por fim, Leiva-Padilla *et al.* (2022) afirmam que, se não houver restrições quanto à configuração do pelotão, o impacto ao pavimento pode exigir ao menos um aumento de 3 a 5 cm de espessura.

Bastola, Souliman e Vechione (2023), utilizaram do *software* Permanent Deformation for Roads (PEDRO), para simular o impacto das deformações permanentes. Foram estabelecidos 375 cenários diferentes, que se diferenciavam em função dos cinco níveis de tráfego selecionados, cinco níveis de cargas dos eixos equivalentes, cinco temperaturas adotadas e três espessuras diferentes de pavimento.

A partir dos resultados encontrados, foi possível indicar o aumento da profundidade das deformações permanentes em função da diminuição da movimentação lateral dos veículos. Em um dos cenários, a altura mudou de 37,7 mm para 181,69 mm, quando não houve variação do movimento. Além disso, o volume de tráfego também demonstrou ser outra variável importante, sendo o número de veículos passantes diretamente proporcional a essa altura do sulco. Como exemplo, cita-se o quadro em que inicialmente a profundidade determinada foi de 37,7 mm para um determinado número de veículos. Ao dobrar esse número de VAs, registrou-se um valor de 75,41 mm de altura.

A temperatura também foi um fator importante, concordando com estudos anteriores que com o seu aumento, são maiores as chances de ocorrência dos sulcos. Efeito semelhante ocorre com a espessura, onde notou-se que quanto maior ela for, maiores as chances de ocorrência dos sulcos. Consequentemente, os autores concluíram que as maiores profundidades das deformações permanentes aconteceram a partir da minimização do deslocamento lateral, do maior número de veículos que trafegam na pista e das temperaturas mais quentes. Com isso, infere-se que os resultados do trabalho de Bastola, Souliman e Vechione (2023) vão de acordo com os obtidos pelos outros estudos mencionados neste trabalho.

6 PROPOSTAS DE SOLUÇÕES

6.1 USO DE SENSORES DE ORIENTAÇÃO DE MOVIMENTO

A partir do contexto de comprovação do impacto na infraestrutura asfáltica por parte dos veículos autônomos, alguns trabalhos encontrados procuraram atenuar esses efeitos. Por exemplo, Chen, Song e Ma (2020) propuseram, como solução para diminuição das trincas e sulcos, o uso de um esquema que tenta alocar a posição dos veículos através de um sensor, cuja função é a de orientar o movimento dos VAs a partir das condições do pavimento.

O funcionamento desse sensor ocorre a partir da passagem dos veículos, sejam eles autônomos ou não, por determinada área de captação. Nesse momento, a sua carga, posição lateral e comprimento do eixo serão detectados pela unidade sensorial e enviados ao sistema. Conseqüentemente, um cálculo será efetuado para determinar a posição lateral para o VA, a partir da avaliação das repercussões para o pavimento. Para os VOHs, o repasse será para que a condução continue a distribuição normal que a caracteriza, enquanto os outros receberão informações para que sigam um dos quatro modelos propostos a seguir.

Segundo Chen, Song e Ma (2020), o que eles chamaram de modo 1, se trata da situação em que os autônomos imitam a movimentação dos humanos. Já o modo 2 se tratou de uma distribuição uniforme das posições dos veículos, permitindo um uso equilibrado do pavimento. O terceiro modo se trata do cenário em que os VAs se movem centralizados nas suas faixas. Por fim, o último cenário se caracteriza pela distribuição da trajetória em função da minimização do dano ao pavimento. Neste, em vez de ser feita a definição da posição do VA primeiramente, opta-se por diminuir a variação do dano por fadiga dentro da faixa. Assim, mantém-se o pavimento dentro da faixa consistente no estado de dano. Ou seja, busca-se distribuir as lesões da forma mais homogênea possível, diminuindo as discrepâncias na área de rolamento.

Para a análise, Chen, Song e Ma (2020) simularam a passagem de 200.000 veículos, alterando as proporções de autônomos e não autônomos em situações que variam de 0% até 100%, em intervalos de 20%. Com isso, pode-se notar que o modo 4 reduz em 20% os danos, quando consiste em 20% da frota, comparado ao cenário em que há 100% de VOHs. Esse índice chega a 28% de redução quando há apenas VAs, enquanto que o modo 2 chega a 27% nessa situação. A partir dos resultados, mesmo que minimamente, pode-se concluir que o método orientado em

função do dano (modo 4) apresentou desempenho superior quando comparado ao método orientado em função da trajetória (modo 2).

6.2 USO DE PELOTÕES DESALINHADOS

Song, Chen e Ma (2021) propuseram um modelo de distribuição do pelotão desalinhado, de forma semelhante ao que foi sugerido por Gungor *et al.* (2020). Para isso, eles utilizaram o método de simulação CFD (*Computational Fluid Dynamics*) para estimar a economia de combustível devido à redução de resistência do ar do pelotão. Segundo os autores, a ferramenta tem sido amplamente utilizada no projeto de veículos e edifícios por ter uma boa eficiência e ser mais econômica que os túneis de vento. O impacto no pavimento foi aferido por modelo de elementos finitos, na ferramenta ABAQUS.

No cenário que considerou que não houve deslocamento lateral no pelotão de caminhões, foram feitos ensaios que utilizaram como variáveis a distância entre os veículos e o número de caminhões presente que compunham essa fila (de 2 a 6 veículos). A partir dos dados obtidos, concluiu-se que, quanto menor for a distância entre os veículos e quanto maior for o número de caminhões, melhores são os índices de economia de combustível. Contudo, o pavimento é o que sofre com os custos.

Considerando que existe o deslocamento lateral entre a frota, utilizou-se da largura da pista como 3,8m (largura líquida de 3,65m) e chegou-se aos valores possíveis de desalinhamento variando de 0,21m até 1,05m, em intervalos de 0,21m. Além disso, foram considerados os espaços de 1,26m, 1,47m e 1,68m, pressupondo um possível alargamento de faixas no futuro.

Conseqüentemente, os estudos indicaram que o veículo líder do pelotão ainda pode usufruir de certa economia de combustível. Contudo, os caminhões que o seguiam tiveram que respeitar um limite máximo para que pudessem alcançar uma economia mínima. Os coeficientes de arrasto para esses veículos ficaram mais altos que os do veículo líder quando esse deslocamento lateral era maior que 1m. Os dados indicaram que quando esse espaço era limitado a até 1,26 m, ainda era possível obter uma taxa mínima de redução no consumo de combustível. Portanto, demonstrou-se que ainda é possível obter economia do combustível mantendo a sustentabilidade do pavimento, contrapondo-se ao estudo de Gungor *et. al* (2020), a partir desse modelo de desalinhamento da frota.

6.3 O USO DE PNEUS MAIS LARGOS E DO MODELO DE ADAPTAÇÃO DAS RODOVIAS EM FUNÇÃO DA FROTA DE VAS

O trabalho de Fahad, Nagy e Fuleki (2020) recomendou o uso de apenas um pneu mais largo, em vez de dois com largura padrão. Segundo os autores, a mudança surtiu efeito. A partir de simulações realizadas no *software* ABAQUS, foram feitos estudos para um volume de tráfego de 30 milhões de caminhões com cargas superiores a 12 toneladas, que passaram por um período de 20 anos, com velocidades que variaram entre 50 e 90 km/h. Em uma situação de movimentação concentrada dos VAs a 90 km/h, os pneus duplos precisam de 3,23 milhões de passagens para gerar uma deformação de 6 mm de profundidade, enquanto que os caminhões com pneus “super largos”, precisam de 30 milhões de passagens para atingir esse mesmo valor.

Por fim, Jehanfo *et al.* (2022) elaborou um estudo que simulava a alteração das larguras das vias e orçava os custos de modificação e manutenção. A partir da simulação dos VAs utilizando o *software* TxME, verificou-se que as pistas mais largas se deterioram mais lentamente do que as mais estreitas. Isso porque há um aumento de área para distribuição da frota. Contudo, os custos de alargamento da via, juntamente com os custos de manutenção além do tempo imposto para essas obras, fazem com que essa opção não seja a mais viável. Consequentemente, em função da taxa de penetração de veículos autônomos na frota, alternativas diferentes podem ser selecionadas. Portanto, os autores concluíram que a adaptação das rodovias existentes pode ser feita de maneira dinâmica, onde as seções transversais são modificadas com base nos índices de inserção dos VAs na frota.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A introdução dos veículos autônomos acarretará impactos em diversos setores sociais e de serviços, dentre eles a infraestrutura pavimentada. Por isso, este estudo buscou investigar quais seriam as principais consequências em virtude dessa inserção para as vias de movimentação dos veículos, a partir de uma revisão de literatura, que apresentou dados consistentes sobre a importância da avaliação preventiva referente à adesão dos VAs.

Com base nos resultados obtidos, o pavimento poderá passar por alguns problemas com essa nova frota, caso não sejam considerados alguns fatores que poderão causar maiores transtornos. Os resultados obtidos foram uníssonos quanto à necessidade de mudança na movimentação dos VAs com relação ao traçado único, apesar de esse cômputo ainda poder ser discutido em função da segurança. Entretanto, existindo garantias de que ela continuará com índices altos, mesmo com a introdução de alterações na trajetória que visem a preservação e melhoria da qualidade do pavimento, essas mudanças devem ser realizadas.

Essa concordância entre as análises é importante devido ao fato de elas utilizarem metodologias diferentes. Apesar disso, infelizmente elas ainda estão no campo da simulação. Desse modo, ainda existem limitações na abordagem do assunto. Essas restrições ocorrem principalmente devido ao fato de os veículos autônomos ainda não serem uma realidade no contexto atual e estarem em fase de testes para sua implementação. Em vista disso, há um limite sobre até que ponto é possível teorizar em função do exposto.

No contexto das implicações práticas, sendo as fissuras e as deformações permanentes os critérios de avaliação para o dimensionamento dos pavimentos, é fundamental levar em consideração esses estudos realizados, a fim de criar soluções que irão mitigar o impacto da introdução dos VAs. Como demonstrado, a importância dessas análises varia tanto para o lado negativo quanto positivo. Isso porque, da mesma forma que as investigações demonstraram que a inserção dos autônomos pode ser prejudicial, também demonstraram que em alguns cenários ela também é capaz de abrandar esses efeitos quando comparados ao panorama atual dos VOHs.

Em função disso, é de grande relevância a previsão de como a estrutura do pavimento irá funcionar com a introdução de novas tecnologias. O estudo revela o quão importante é essa investigação a fim de se resguardar e evitar que a identificação de problemas ocorra de forma

tardia. Nesse sentido, foi possível verificar o quão adversa pode ser essa introdução sem estudos adequados, não apenas à infraestrutura em si, mas também à segurança dos usuários. Isso foi demonstrado nos estudos que sugerem maiores riscos de aquaplanagem por parte dos veículos leves, devido aos maiores índices de deformações permanentes.

Por fim, é possível concluir que o estudo atingiu os seus objetivos e permitiu esclarecer quais são os principais pontos quanto à introdução dos veículos autônomos no contexto da infraestrutura do pavimento. Considerando as peculiaridades do contexto nacional, que faz uso de materiais tropicais para infraestrutura, recomenda-se como sugestão de novos trabalhos, a avaliação dos critérios de dimensionamento de pavimentos, a partir do *software* MeDiNa. Essa análise seria de grande importância, em função de estudos que indicam que, em razão desses materiais utilizados, os pavimentos são mais suscetíveis ao trincamento por fadiga do que as deformações permanentes. Consequentemente, aferir essa repercussão é relevante para que em projetos futuros, se escolha os materiais mais adequados para determinada situação.

REFERÊNCIAS

ALONSO-ESTÉBANEZ, Alejandro; DÍAZ, Juan Jose del Coz; ÁLVAREZ-RABANAL, Felipe Pedro; MUÑOZ, Pablo Pascual; GARCIA NIETO, Pablo Pascual-Muñoz Paulino Jose. Numerical investigation of truck aerodynamics on several classes of infrastructures. **Wind and Structures An International Journal**, [S. l.], v. 26, n. 1, p. 35-43, 4 jan. 2018.

BASTOLA, Nitish R.; SOULIMAN, Mena I.; VECHIONE, Matthew. Preliminary study on rutting performance of pavement structures under the effect of future autonomous vehicle movements. **Innovative Infrastructure Solutions**, [S. l.], v. 8, n. 1, p. 1-12, 5 jan. 2023.

BAUER, Luiz Alfredo Falcão. **Materiais de construção**. 6. ed. rev. e atual. Rio de Janeiro: LTC, 2018a. 656 p. v. 2. ISBN 978-8521632351.

BAUER, Luiz Alfredo Falcão. **Materiais de construção**. 6. ed. rev. e atual. Rio de Janeiro: LTC, 2018b. 563 p. v. 1. ISBN 978-8521632344.

BERNUCCI, Liedi; MOTTA, Laura; CERATTI, Jorge Augusto Pereira; SOARES, Jorge Barbosa. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. 2. ed. atual. Rio de Janeiro: [s. n.], 2022. 750 p. ISBN 978-85-69658-02-3.

BORGES, Paulo Roberto. **ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS ASFÁLTICAS A QUENTE ANALISADAS PELOS MÉTODOS DE DOSAGEM MARSHALL E SUPERPAVE**. 2019. 147 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) - UFV, Minas Gerais, 2019.

CHEN, Feng; SONG, Mingtao; MA, Xiaoxiang. A lateral control scheme of autonomous vehicles considering pavement sustainability. **A lateral control scheme of autonomous vehicles considering pavement sustainability**, [s. l.], v. 256, p. 40, 2020. DOI <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120669>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652620307162>. Acesso em: 16 set. 2023.

CHEN, Feng; SONG, Mingtao; MA, Xiaoxiang; ZHU, Xingyi. Assess the impacts of different autonomous trucks' lateral control modes on asphalt pavement performance. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, [S. l.], v. 103, p. 17-29, 5 abr. 2019.

CNT (Brasil). Confederação Nacional do Transporte (ed.). **Painel CNT de Acidentes Rodoviários**. Brasília, 2023. Disponível em: <https://www.cnt.org.br/painel-acidente>. Acesso em: 6 out. 2023.

CNT (Brasil). Confederação Nacional do Transporte (coord.). **Sobram vagas para motoristas no Transporte Rodoviário de Cargas**: A oportunidade de emprego no TRC está retratada na primeira Pesquisa CNT Perfil Empresarial sobre o segmento. 12. ed. [S. l.], 11 abr. 2022a. Disponível em: <https://cnt.org.br/agencia-cnt/sobram-vagas-para-motoristas-no-transporte-rodoviario-de-cargas>. Acesso em: 6 out. 2023.

CNT (Brasil). Confederação Nacional do Transporte (ed.). **Pesquisa CNT de Rodovias 2022**. Brasília, 2022b. Disponível em: <https://pesquisarodovias.cnt.org.br/conteudo>. Acesso em: 10 out. 2023.

DER-PR (Paraná). Lucas Bach Adada (coord.). **Programa de Integração e Capacitação - DER/2008: Tópicos de Projeto Asfálticos e de Cimento Portland**. [S. l.], 2008. Disponível em: <https://pt.slideshare.net/MarcosVinicius414/pavimentos-flexiveiserigidos-lucasadada>. Acesso em: 27 out. 2023.

DNIT (Brasil). Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes (ed.). **MANUAL DE PAVIMENTAÇÃO**: Publicação IPR - 719. Rio de Janeiro, 2006. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-manuais/vigentes/ipr_719_manual_de_pavimentacao_versao_corrigda_errata_1.pdf. Acesso em: 3 nov. 2023.

DNIT (Brasil). Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes (ed.). **NORMA DNIT 005/2003 - TER**: Defeitos nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos Terminologia. Rio de Janeiro, 2003. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/terminologia-ter/dnit_005_2003_ter-1.pdf. Acesso em: 2 nov. 2023.

DNIT (Brasil). Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes (ed.). **NORMA DNIT 178/2018 - PRO**: Pavimentação asfáltica - Preparação de corpos de prova para ensaios mecânicos usando o compactador giratório Superpave ou o Marshall – Procedimento. Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/procedimento-pro/DNIT_178_2018_PRO1.pdf. Acesso em: 14 nov. 2023.

DONELSON, B. (2020). Coronavirus Response: **Real-World Case for Expanded Autonomous Vehicles Testing in the U.S.** JDSupra. <https://www.jdsupra.com/legalnews/coronavirus-response-real-world-case-56295/>

DUARTE, Fábio; RATTI, Carlo. The Impact of Autonomous Vehicles on Cities: A Review. **Journal of Urban Technology**, [S. l.], v. 25, n. 4, p. 3-18, 2 out. 2018.

FAGNANT, Daniel J.; KOCKELMAN, Kara. Preparing a nation for autonomous vehicles: opportunities, barriers and policy recommendations. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, [S. l.], ano 2018, v. 77, p. 167-181, 15 jul. 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0965856415000804>. Acesso em: 4 jul. 2023.

FAHAD, Mohammad; NAGY, Richard; FULEKI, Peter. Creep model to determine rut development by autonomous truck axles on pavement. *Pollack Periodica*, [S. l.], v. 17, n. 1, p. 66-71, 25 mar. 2022.

FRANCO, Filipe Augusto Cinque de Proença. **MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO MECANÍSTICO-EMPÍRICO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS - SISPAV**. 2007. 315 p.

Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Coordenação dos Programas de Pós-Graduação em Engenharia (COPPE) - UFRJ, Rio de Janeiro, 2007.

GEORGOULI, Konstantina; PLATI, Christina. Autonomous trucks' (ATs) lateral distribution and asphalt pavement performance. **International Journal of Pavement Engineering**, [S. l.], p. 1-22, 5 mar. 2022.

GUNGOR, Osman Erman; AL-QADI, Imad L. Wander 2D: a flexible pavement design framework for autonomous and connected trucks. **International Journal of Pavement Engineering**, [S. l.], v. 23, n. 1, p. 121-136, 12 mar. 2020a.

GUNGOR, Osman Erman; AL-QADI, Imad L. All for one Centralized optimization of truck platoons to improve roadway infrastructure sustainability. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, [S. l.], v. 114, n. 1, p. 84-98, 18 maio 2020b.

GUNGOR, Osman Erman; SHE, Ruifeng; AL-QADI, Imad L.; OUYANG, Yanfeng. One for all: Decentralized optimization of lateral position of autonomous trucks in a platoon to improve roadway infrastructure sustainability. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, [S. l.], v. 120, n. 102783, p. 1-15, 4 out. 2020.

HARDING, John; POWELL, Gregory; YOON, Rebecca; FIKENTSCHER, Joshua; DOYLE, Charlene; SADE, Dana; LUKUC, Mike; SIMONS, Jim; WANG, Jing. Vehicle-to-Vehicle Communications:: Readiness of V2V Technology for Application. **National Highway Traffic Safety Administration**, [S. l.], v. 23, n. 6, p. 305, 1 ago. 2014.

HUANG, Kai; ONIFADE, Ibrahim; BIRGISSON, Bjorn. Calibration of mechanics-based pavement predictive framework for top-down cracking performance of flexible pavement considering wheel wander effect. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 306, p. 124792, 15 set. 2021.

IPR (Brasil). Instituto de Pesquisas Rodoviárias (ed.). **Execução de estudos e pesquisa para elaboração de método de análise mecânico - empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos**: Manual de Utilização do programa MeDiNa Apresentação dos programas. Brasília, 2020a. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/medina/medina-1-1-4-manual-de-utilizacao.pdf>. Acesso em: 27 out. 2023.

IPR (Brasil). Instituto de Pesquisas Rodoviárias (ed.). **Manual de Ajuda**: Programa MeDiNa versão 1.1.5. Brasília, 2020b. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/medina/manual_medina_1_1_5.pdf. Acesso em: 27 out. 2023.

JEHANFO, Hameed; HU, Sheng; KAPARIAS, Ioannis; PRESTON, John; ZHOU, Fujie; STEVENS, Alan. Redesigning Highway Infrastructure Systems for Connected Autonomous Truck Lanes: Part A: Systems. **Journal of Transportation Engineering**, [S. l.], v. 148, n. 12, p. 1-19, 25 mar. 2022.

KURU, Kaya; KHAN, Wasiq. A Framework for the Synergistic Integration of Fully Autonomous Ground Vehicles With Smart City. **IEEE Access**, [S. l.], v. 9, p. 923-948, 5 jan. 2021.

LEIVA-PADILLA, Paulina; BLANC, Juliette; HAMMOUM, Ferhat; SALGADO, Aitor; CHAILLEUX, Emmanuel; MATEOS, Angel; HORNYCH, Pierre. The impact of truck platooning action on asphalt pavement: a parametric study. **International Journal of Pavement Engineering**, [s. l.], 2022.

LITMAN, Todd. Autonomous Vehicle Implementation Predictions: Implications for Transport Planning. **Victoria Transport Policy Institute**, [S. l.], ano 2023, p. 1-49, 21 jun. 2023. Disponível em: <https://www.vtpi.org/avip.pdf>. Acesso em: 4 jul. 2023.

MARQUES, Geraldo Luciano de Oliveira. **UTILIZAÇÃO DO MÓDULO DE RESILIÊNCIA COMO CRITÉRIO DE DOSAGEM DE MISTURA ASFÁLTICA; EFEITO DA COMPACTAÇÃO POR IMPACTO E GIRATÓRIA**. 2004. 490 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Coordenação dos Programas de Pós-Graduação em Engenharia (COPPE) - UFRJ, Rio de Janeiro, 2004.

MEDINA, Jacques de; MOTTA, Laura Maria Goretti da. **Mecânica dos pavimentos**. 3. ed. atual. Rio de Janeiro: [s. n.], 2015. 640 p. ISBN 978-85-7193-366-8.

MOHER, David; SHAMSEER, Larissa; CLARKE, Mike; GHERSI, Davina; LIBERATI, Alessandro; PETTICREW, Mark; SHEKELLE, Paul; STEWART, Lesley A; GROUP, PRISMA-P. Preferred reporting items for systematic review and meta-analysis protocols (PRISMA-P) 2015 statement. **Systematic Reviews**, [S. l.], ano 2015, v. 4, n. 1, p. 1-18, 1 jan. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/2046-4053-4-1>. Acesso em: 4 jul. 2023.

NOORVAND, Hossein; KARNATI, Guru; UNDERWOOD, B. Shane. AUTONOMOUS VEHICLES: AN ASSESSMENT OF THE IMPLICATIONS OF TRUCK POSITIONING ON FLEXIBLE PAVEMENT PERFORMANCE AND DESIGN. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, [s. l.], v. 2640, ed. 1, p. 21-28, 2017.

OMS. Organização Mundial da Saúde. PLANO GLOBAL: DÉCADA DE AÇÃO PELA SEGURANÇA NO TRÂNSITO 2021-2030. **Safety and Mobility**, [s. l.], 2021.

OPAS (Brasília - DF). ORGANIZAÇÃO PAN-AMERICANA DA SAÚDE. **Trânsito: Um olhar da saúde para o tema**. Trânsito: Um olhar da saúde para o tema. Brasília - DF, p. 1-94, 2018.

OTHMAN, Kareem. Impact of Autonomous Vehicles on the Physical Infrastructure: Changes and Challenges. **Impact of Autonomous Vehicles on the Physical Infrastructure: Changes and Challenges**, [s. l.], v. 5, ed. 3, p. 40, 2021. DOI <https://doi.org/10.3390/designs5030040>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2411-9660/5/3/40>. Acesso em: 17 set. 2023.

POMONI, Maria. Exploring Smart Tires as a Tool to Assist Safe Driving and Monitor Tire-Road Friction: Vehicles. **MDPI**, [S. l.], v. 4, n. 3, p. 744-765, 26 jul. 2022.

PRIME: Avaliação da Metodologia de Cálculo para Determinação do Módulo de Resiliência por Compressão Diametral para Fins de Projeto de Pavimento e Controle de Qualidade de Obras. In: **PESQUISA CONCEPA /ANTT**: Relatório final de Pesquisa por Prime Engenharia e Consultoria LTDA.. Porto Alegre, 2008. Disponível em: <https://www.gov.br/antt/pt-br/assuntos/rodovias/relatorios/relatorios-de-pesquisa-rdt/projetos-rdt/concepa/finalizado/avaliacao-da-metodologia-de-calculo.pdf>. Acesso em: 27 out. 2023.

RANA, Masud; HOSSAIN, Kamal. Simulation of autonomous truck for minimizing asphalt pavement distresses. **Road Materials and Pavement Design**, [S. l.], v. 23, n. 6, p. 1266-1286, 25 jan. 2021.

SAE International, 2021. **Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles**. SAE J3016_201609. SAE International, Warrendale.

SHE, Ruifeng; OUYANG, Yanfeng. Generalized link cost function and network design for dedicated truck platoon lanes to improve energy, pavement sustainability and traffic efficiency. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, [S. l.], v. 140, n. 103667, p. 1-20, 5 maio 2022.

SONG, Mingtao; CHEN, Feng; MA, Xiaoxiang. Organization of autonomous truck platoon considering energy saving and pavement fatigue. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, [S. l.], v. 90, n. 102667, p. 1-12, 5 jan. 2021.

SOUZA, Paloma Morais de. **Revisão sistemática múltipla para o desenvolvimento do Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa) quanto à deformação permanente na camada de revestimento asfáltico**. Orientador: José Leomar Fernandes Júnior. 2021. 153 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes (EESC) - USP, São Carlos - SP, 2021.

STEYN, Wynand JvdM; MAINA, James. Guidelines for the use of accelerated pavement testing data in autonomous vehicle infrastructure research. **Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)**, [s. l.], v. 6, ed. 3, p. 273-281, 2019. DOI <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2019.05.001>. Disponível em: <https://iris.paho.org/handle/10665.2/49709>. Acesso em: 16 set. 2023.

TETRACON (Brasil). Indústria Tetracon (coord.). **Qual a diferença entre pavimento de concreto e pavimento asfáltico?**. [S. l.], 2019. Disponível em: <https://tetraconind.com.br/pisos-intertravados/qual-a-diferenca-entre-pavimento-de-concreto-e-pavimento-asfaltico/>. Acesso em: 2 nov. 2023.

ZHENG, Binshuang; HUANG, Xiaoming; ZHAO, Runmin; HONG, Zhengqiang; CHEN, Jiaying; ZHU, Shengze. Study on the Rut Control Threshold of Asphalt Pavement Considering Steering Stability of Autonomous Vehicles Based on Fuzzy Control Theory: Advances in Civil Engineering. **Hidawi**, [S. l.], v. 2021, p. 1-13, 17 abr. 2021.

ZHONG, Haotian; LI, Wei. What if autonomous vehicles had been introduced into. **Urban Studies**, [S. l.], p. 1-18, 9 mar. 2023.

ZHOU, Fujie; HU, Sheng; CHRYSLER, Susan T.; KIM, Yangwoo; DAMNJANOVIC, Ivan; TALEBPOUR, Alireza; ESPEJO, Alejandro. Optimization of Lateral Wandering of Automated Vehicles to Reduce Hydroplaning Potential and to Improve Pavement Life. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, [S. l.], v. 2673, p. 81-89, 5 abr. 2019.