

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

Maurício Castilhos de Oliveira

**EFEITOS DA LUZ DO AMBIENTE E DE
SINALIZAÇÃO HORIZONTAL NA SEGURANÇA EM
RODOVIAS: ESTUDO EM SIMULADOR DE DIREÇÃO
IMERSIVO**

Porto Alegre

2019

Maurício Castilhos de Oliveira

**Efeitos da Luz do Ambiente e de Sinalização Horizontal na Segurança em Rodovias:
Estudo em Simulador de Direção Imersivo**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção, modalidade Acadêmica, na área de concentração em Sistemas de Transportes.

Orientadora: Christine Tessele Nodari, Dr.^a

Porto Alegre

2019

Maurício Castilhos de Oliveira

**Efeitos da Luz do Ambiente e de Sinalização Horizontal na Segurança em Rodovias:
Estudo em Simulador de Direção Imersivo**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção na modalidade Acadêmica e aprovada em sua forma final pela Orientadora e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof.^a Christine Tessele Nodari, Dr.^a

Orientadora PPGEP/UFRGS

Prof. Flávio Sanson Fogliatto

Coordenador PPGEP/UFRGS

Banca Examinadora:

Professora Ana Margarita Larrañaga Uriarte, Dr.^a (PPGEP/UFRGS)

Professora Brenda Medeiros Pereira, Dr.^a (UFSM)

Professor Flavio Pechansky, Dr. (PPGPSIQ/UFRGS)

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Prof.^a Christine Tessele Nodari, orientadora deste trabalho, pela disponibilidade de tempo e pelas assessorias que me proporcionaram desenvolver este trabalho.

Agradeço ao Prof. Daniel Sergio Presta García pelos auxílios e dicas que me ajudaram a aperfeiçoar este trabalho.

Agradeço aos Profs. Ana Margarita Larrañaga Uriarte, Brenda Medeiros Pereira e Flavio Pechansky por fazerem parte da banca examinadora e por sugerirem melhorias para este trabalho.

Agradeço às empresas MO3 e BS Motion e à equipe do VizLab/UNISINOS pelo apoio na realização do experimento.

Agradeço à Tânia Batistela Torres e à Laísa Braga Kappler pelo suporte prestado na organização da coleta de dados.

Agradeço ao Douglas Zechin pelas dicas de programação.

Agradeço à Verônica Oliveira pelos auxílios prestados.

Agradeço aos professores e aos alunos do Departamento de Produção e Transportes da Universidade Federal do Rio Grande do Sul por terem contribuído na minha formação.

Agradeço à Cristhiane Paludo Demore pelas sugestões referentes a este trabalho e também pelo carinho e incentivo proporcionados nos momentos de dificuldade.

Agradeço à minha família e aos meus amigos que acompanharam nesta jornada compartilhando sabedoria e diversão.

RESUMO

Esta dissertação tem como objetivo estimar os impactos da variação da luminosidade do ambiente e da presença das linhas de centro e de bordo na pista sobre o perfil de velocidade e sobre o posicionamento de veículos em uma rodovia de pista simples. Para atingir tal objetivo foi avaliado o comportamento de condução de motoristas voluntários em um simulador de direção imersivo, para o qual foram desenvolvidos cenários rodoviários virtuais. Adicionalmente, esta pesquisa se propõe a analisar a influência do gênero e da idade do motorista sobre a velocidade e sobre a posição lateral praticada. Os experimentos envolveram um total de 56 participantes determinados a partir de um projeto de experimentos fatorial 2^k . A análise dos dados foi feita por meio de teste de hipóteses (teste t), análise de variância (ANOVA) e coeficiente de variação. Os resultados apontam que os homens conduziram mais rápido quando não havia linhas de centro e de bordo na pista, enquanto mulheres conduziram mais rápido quando as linhas estavam presentes, e que os condutores jovens praticaram velocidades maiores e se posicionaram mais perto do eixo da pista que os condutores idosos. Os resultados evidenciam que a luminosidade do ambiente e a presença das linhas de centro e de bordo afetam tanto a velocidade quanto o posicionamento dos veículos na via e, conforme literatura, esses parâmetros afetam a segurança viária.

Palavras-chave: Segurança viária. Simulador de direção. Velocidade. Posição lateral. Linhas de bordo. Luminosidade do ambiente.

ABSTRACT

This dissertation aims to estimate the impacts of the variation of the ambient light and the presence of the centerline and edge lines on the road on the speed profile and the positioning of vehicles on a single lane highway. In order to achieve this objective, the driving behavior of volunteer drivers was evaluated in an immersive driving simulator, for which virtual highway scenarios were developed. Additionally, this study aims to analyze the influence of gender and the age of the driver on the speed choice and the lateral position. The experiments involved a total of 56 participants determined from a 2^k factorial experiment design. Data analysis was performed using hypothesis test (t test), analysis of variance (ANOVA) and coefficient of variation. The results indicate that men drove faster when there were no centerline and edge lines on the road, while women drove faster when the lines were present, and that young drivers performed higher speeds and positioned themselves closer to the road axis than older drivers. The results show that the ambient light and the presence of the centerline and edge lines affect both the speed and the positioning of vehicles on the road and, according to the literature, these parameters affect road safety.

Key words: Road safety. Driving simulator. Speed. Lateral position. Edge lines. Ambient light.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Organização da dissertação	15
Figura 2 – Estrutura de um <i>boxplot</i>	16

Artigo 1: EFEITO DAS LINHAS DE CENTRO E DE BORDO DE UMA RODOVIA SOBRE A VELOCIDADE PRATICADA POR CONDUTORES EM SIMULADOR DE DIREÇÃO IMERSIVO

Figura 1 – Simulador de direção imersivo	24
Figura 2 – Ilustração dos cenários com e sem linhas de centro e de bordo	25
Figura 3 – Perfil de velocidade de cada faixa etária nos cenários com e sem linhas	27
Figura 4 – Perfil de velocidade da faixa etária “menor que 30 anos”	27
Figura 5 – Perfil de velocidade da faixa etária “entre 31 e 60 anos”	28
Figura 6 – Perfil de velocidade da faixa etária “maior que 61 anos”	29
Figura 7 – <i>Boxplot</i> da velocidade em função das linhas e da idade	30
Figura 8 – <i>Boxplot</i> da velocidade em função das linhas e do gênero	31

Artigo 2: ANÁLISE DA VELOCIDADE PRATICADA SOB UMA PERSPECTIVA DE SEGURANÇA VIÁRIA: ESTUDO EM SIMULADOR DE DIREÇÃO IMERSIVO

Figura 1 – Simulador de direção imersivo	43
Figura 2 – Ilustração dos diferentes cenários	44
Figura 3 – <i>Boxplot</i> da velocidade em função do gênero	48
Figura 4 – Interação dos fatores controláveis com a variável resposta	49
Figura 5 – <i>Boxplot</i> da velocidade em função do cenário	50

Artigo 3: ANÁLISE DA POSIÇÃO LATERAL SOB UMA PERSPECTIVA DE SEGURANÇA VIÁRIA

Figura 1 – Simulador de direção imersivo	63
--	----

Figura 2 – Ilustração dos diferentes cenários	64
Figura 3 – Medição da posição lateral	66
Figura 4 – <i>Boxplot</i> da posição lateral em função da faixa etária	68
Figura 5 – Efeitos de primeira ordem sobre a posição lateral	69
Figura 6 – Interação de segunda ordem sobre a posição lateral	70
Figura 7 – <i>Boxplot</i> da posição lateral em função do cenário	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Organização dos experimentos	15
---	----

Artigo 1: EFEITO DAS LINHAS DE CENTRO E DE BORDO DE UMA RODOVIA SOBRE A VELOCIDADE PRATICADA POR CONDUTORES EM SIMULADOR DE DIREÇÃO IMERSIVO

Tabela 1 – Resumo da análise estatística para as faixas etárias sem a repetição do segmento	29
---	----

Tabela 2 – Resumo da análise estatística para os gêneros sem a repetição do segmento	31
--	----

Artigo 2: ANÁLISE DA VELOCIDADE PRATICADA SOB UMA PERSPECTIVA DE SEGURANÇA VIÁRIA: ESTUDO EM SIMULADOR DE DIREÇÃO IMERSIVO

Tabela 1 – Níveis dos fatores controláveis	45
--	----

Tabela 2 – Teste de homogeneidade de variância	46
--	----

Tabela 3 – Testes de normalidade dos resíduos	47
---	----

Tabela 4 – Resumo da análise de variância	47
---	----

Tabela 5 – Coeficiente de variação de cada cenário para a velocidade	49
--	----

Artigo 3: ANÁLISE DA POSIÇÃO LATERAL SOB UMA PERSPECTIVA DE SEGURANÇA VIÁRIA

Tabela 1 – Níveis dos fatores controláveis	65
--	----

Tabela 2 – Teste de homogeneidade de variância	67
--	----

Tabela 3 – Testes de normalidade dos resíduos	67
---	----

Tabela 4 – Resumo da análise de variância	68
---	----

Tabela 5 – Coeficiente de variação de cada cenário para a posição lateral	70
---	----

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	11
1.1 COMENTÁRIOS INICIAIS	11
1.2 TEMA E OBJETIVOS	13
1.3 JUSTIFICATIVA DO TEMA E DOS OBJETIVOS	13
1.4 MÉTODO	14
1.5 DELIMITAÇÕES DO TRABALHO	16
1.6 LIMITAÇÕES DO TRABALHO	17
1.7 ESTRUTURA DO TRABALHO	17
CAPÍTULO 2 – ARTIGO 1: EFEITO DAS LINHAS DE CENTRO E DE BORDO DE UMA RODOVIA SOBRE A VELOCIDADE PRATICADA POR CONDUTORES EM SIMULADOR DE DIREÇÃO IMERSIVO	19
2.1 INTRODUÇÃO	20
2.2 REFERENCIAL TEÓRICO	21
2.2.1 Simuladores de direção em transportes	21
2.2.2 Sinalização horizontal, velocidade praticada e acidentes em rodovias	22
2.3 MÉTODO	23
2.3.1 Simulador de direção	23
2.3.2 Cenário do estudo	24
2.3.3 Participantes	25
2.3.4 Coleta de dados	25
2.3.5 Procedimentos adotados na realização do experimento	25
2.4 RESULTADOS	26
2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	32
CAPÍTULO 3 – ARTIGO 2: ANÁLISE DA VELOCIDADE PRATICADA SOB UMA PERSPECTIVA DE SEGURANÇA VIÁRIA: ESTUDO EM SIMULADOR DE DIREÇÃO IMERSIVO	37
3.1 INTRODUÇÃO	38
3.2 REFERENCIAL TEÓRICO	39
3.2.1 Simuladores de direção em transportes	39
3.2.2 Luminosidade e sinalização horizontal	40
3.2.3 Velocidade praticada e segurança viária	42
3.3 MÉTODO	42
3.3.1 Simulador de direção	43
3.3.2 Cenário do estudo	44

3.3.3 Projeto de experimentos	44
3.3.4 Coleta e análise de dados	45
3.3.5 Procedimentos adotados na realização do experimento	46
3.4 RESULTADOS	46
3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	51
CAPÍTULO 4 – ARTIGO 3: ANÁLISE DA POSIÇÃO LATERAL SOB UMA PERSPECTIVA DE SEGURANÇA VIÁRIA	57
4.1 INTRODUÇÃO	58
4.2 REFERENCIAL TEÓRICO	59
4.2.1 Simuladores de direção em transportes	59
4.2.2 Luminosidade do ambiente e sinalização horizontal	60
4.2.3 Posicionamento lateral e segurança viária	62
4.3 MÉTODO	63
4.3.1 Simulador de direção	63
4.3.2 Cenário do estudo	64
4.3.3 Projeto de experimentos	64
4.3.4 Coleta e análise de dados	65
4.3.5 Procedimentos adotados na realização do experimento	66
4.4 RESULTADOS	67
4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	72
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES	77
REFERÊNCIAS	80

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

1.1 COMENTÁRIOS INICIAIS

A segurança viária tem sido uma crescente preocupação de órgãos de trânsito e de gestores devido à elevada ocorrência de acidentes tanto em vias urbanas quanto em rodovias. Segundo WHO (2018), as mortes no trânsito ainda são responsáveis por mais de um milhão de óbitos a cada ano, sendo a oitava causa que mais mata pessoas de todas as idades. Entende-se que os motivos dos acidentes estão compreendidos em fatores viário-ambientais, humanos e veiculares. Acredita-se que estes fatores interagem entre si e desta interação pode-se ter situações mais ou menos favoráveis quanto à segurança viária. Os fatores viário-ambientais incluem parâmetros de projeto – como largura de faixa, largura de acostamento e sinalização horizontal –, medidas de segurança – como presença de defensas –, luminosidade do ambiente, entre outros. Esses fatores podem influenciar no comportamento do condutor na via (fator humano). Uma das teorias vigentes que busca explicar aspectos do comportamento dos condutores expostos a mudanças no ambiente viário é a teoria de compensação de risco discutida por Summala (1996). De acordo com esta teoria o condutor possui uma margem de segurança quando está dirigindo, e apenas quando essa margem é excedida é que seu comportamento será alterado. Desta forma, quando o condutor percebe que excede sua margem de segurança, seu comportamento na condução é ajustado. Este ajuste pode se dar pela alteração da velocidade ou da posição lateral do veículo na via. Por este motivo o controle de velocidade nas rodovias e a sinalização horizontal de demarcação das pistas são medidas usadas na tentativa de se prover ambientes viários seguros (VADEBY; FORSMAN, 2018; CHARLTON *et al.*, 2018).

A sinalização horizontal em rodovias (fator viário), que são pinturas sobre o revestimento da pista, possui a função tanto de instrução quanto de guia para os usuários. Essas pinturas ordenam e canalizam o fluxo de veículos, orientam o deslocamento de veículos, complementam a sinalização vertical e fornecem informação sobre a posição do centro e do bordo da pista (DNIT, 2010; ZWAHLEN; SCHNELL, 1999). Alguns estudos mostram que a presença das linhas de centro e de bordo em rodovias pode influenciar a

velocidade praticada pelos condutores (MILLER, 1992; FILDES *et al.*, 1987; RANNEY; GAWRON, 1986) e, como altas velocidades tendem a estar associadas ao aumento tanto da severidade quanto da frequência de acidentes (ELVIK, 2013; ELVIK, 2019; NILSSON, 2004), sua presença pode impactar na segurança viária. Analogamente, a luminosidade do ambiente (fator ambiental) também pode impactar na segurança viária. Alguns estudos sobre condução durante a noite sugerem que acidentes ocorridos nesse período possuem maior severidade, impactando diretamente nas taxas de mortalidade (WILLIAMS, 2013; OWENS; SIVAK, 1996). Outros elementos, entretanto, além da luminosidade do ambiente, podem estar envolvidos tanto na ocorrência quanto na severidade de acidentes durante a noite como o tempo de reação, a idade e o perfil de condução dos motoristas. Um tempo de reação maior durante a condução noturna provoca um aumento na distância de parada do veículo e pode aumentar a probabilidade de acidentes. Motoristas homens e jovens possuem muito mais chance de se envolver em um acidente durante a noite, pois a ocorrência de acidentes não se relaciona apenas com a luminosidade, mas também com o estilo de condução (CLARKE *et al.*, 2006; WILLIAMS, 2013; PLAINIS; MURRAY, 2002). Contudo, estudar os efeitos dos fatores viário-ambientais em campo pode ser uma tarefa difícil, pois nem sempre eles agem isoladamente. A interação entre fatores pode provocar efeitos distintos sobre o comportamento do condutor na via.

Como uma tentativa de superar tal dificuldade, pode-se recorrer ao uso de simuladores de direção para realizar estudos em segurança viária. Essa ferramenta possibilita investigar o efeito de fatores controláveis isolada ou conjuntamente e possui características como versatilidade no estudo, segurança aos envolvidos e relação custo-benefício mais desejável quando comparado a pesquisas realizadas em campo. Avanços tecnológicos estão possibilitando a criação de ambientes virtuais mais fiéis à realidade, viabilizando a reprodução do comportamento do condutor de maneira semelhante às situações reais e permitindo estudos sobre situações difíceis de avaliar em campo devido a fatores referentes à obtenção de amostra adequada e à coleta de dados em condições controladas como, por exemplo, níveis similares de luminosidade.

Nesse contexto, esta dissertação apresenta um estudo sobre segurança viária em rodovias de pista simples com o uso de simulador de direção imersivo. Por meio de análise estatística dos dados de condução em um trecho de rodovia virtual, estimou-se o efeito de fatores controláveis como gênero e idade do condutor, luminosidade do ambiente e presença das linhas de centro e de bordo na pista sobre a velocidade e sobre a posição lateral praticada

– parâmetros que foram considerados como métrica de segurança viária. As próximas seções desta introdução apresentam: (i) o tema e os objetivos do estudo; (ii) a justificativa do tema e dos objetivos; (iii) o método utilizado para atender ao objetivo proposto; (iv) as delimitações do estudo; (v) as limitações do estudo; e (vi) a estrutura do trabalho.

1.2 TEMA E OBJETIVOS

O tema tratado nesta dissertação compreende a influência da luminosidade do ambiente e de sinalização rodoviária horizontal sobre a condução de veículos em rodovias de pista simples. O trabalho tem como objetivo geral estimar os impactos da variação da luminosidade do ambiente e da presença das linhas de centro e de bordo na pista no perfil de velocidade e no posicionamento do veículo praticado por condutores. Como objetivo específico deste estudo destaca-se: análise da influência do gênero e da idade do condutor sobre os parâmetros estudados.

1.3 JUSTIFICATIVA DO TEMA E DOS OBJETIVOS

A velocidade praticada por motoristas em rodovias possui uma função importante no gerenciamento e controle de tráfego. Entende-se que ela é um fator determinante no número e na frequência de acidentes (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2010). Altas velocidades tendem a estar associadas ao aumento tanto da severidade quanto da frequência de acidentes (ELVIK, 2013; ELVIK, 2019; NILSSON, 2004), e a variabilidade da velocidade pode tanto aumentar o risco de acidentes como diminuir a eficiência da rede viária (GARBER; EHRHART, 2000; VAN NES *et al.*, 2010). Dado que aspectos viário-ambientais como presença das linhas de centro e de bordo na pista impactam na velocidade praticada e na sua variação durante a condução em rodovias (MILLER, 1992; FILDES *et al.*, 1987; RANNEY; GAWRON, 1986), é importante pesquisar esses aspectos em favor de melhorias na segurança viária.

No Brasil, as rodovias de pista simples compreendem aproximadamente 94% da malha rodoviária pavimentada (CNT, 2017). Esse tipo de rodovia foi responsável por 58% dos acidentes com vítimas de 2007 a 2017 (CNT, 2018). Compativelmente com a regulamentação, nesse ambiente praticam-se velocidades altas comparativamente ao meio urbano, o que torna

as rodovias de pista simples mais suscetíveis à ocorrência de acidentes. Nesse contexto, justifica-se investigação de rodovias de pista simples no Brasil quanto aos aspectos viário-ambientais e seus impactos na velocidade e na variação da velocidade praticada.

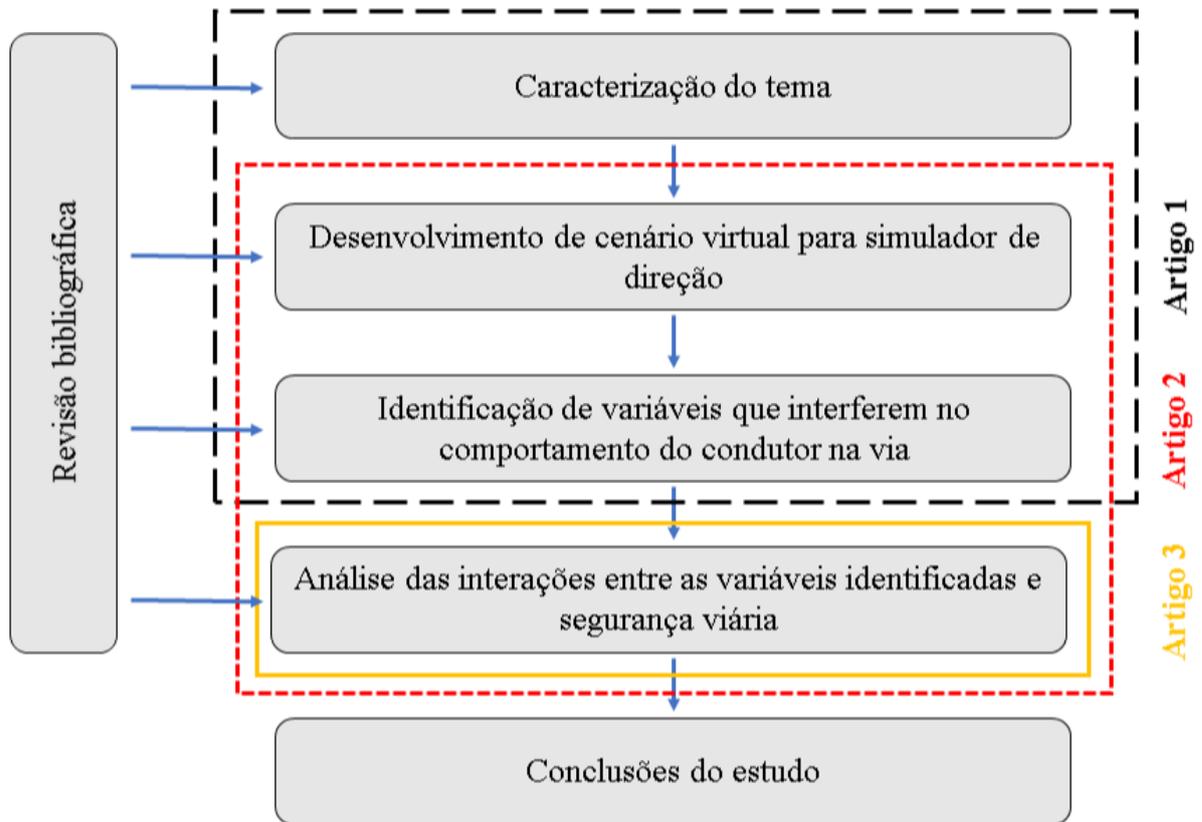
1.4 MÉTODO

O método de pesquisa adotado neste estudo pode ser classificado de acordo com sua natureza, abordagem do problema, objetivos e procedimentos técnicos. Quanto a sua natureza, esta pesquisa é classificada como aplicada, pois visa produzir conhecimentos para solucionar problemas específicos dos departamentos de trânsito. Quanto à abordagem do problema, é considerada quantitativa devido à análise de variáveis quantitativas e à aplicação de técnicas estatísticas tais como teste de hipóteses (teste t) e análise de variância (ANOVA). Do ponto de vista dos objetivos, é considerada como explicativa, uma vez que identifica as relações entre as variáveis estudadas. Os procedimentos técnicos, por sua vez, são considerados experimentais, pois os níveis das variáveis são controlados pelo pesquisador.

Esta dissertação foi desenvolvida conforme as etapas apresentadas na Figura 1. A revisão bibliográfica se estendeu durante toda a pesquisa e teve como propósito obter conhecimento sobre o uso de simuladores de direção em pesquisas científicas, sobre a mudança de comportamento dos condutores devido à alteração de fatores viário-ambientais e sobre o impacto dessa mudança de comportamento na segurança viária. Proporcionou, ainda, apoio na discussão dos resultados obtidos nesta pesquisa com aqueles já relatados na literatura.

Com base nas informações adquiridas na revisão bibliográfica, definiu-se o tema da dissertação – influência da luminosidade do ambiente e de sinalização rodoviária horizontal sobre a condução de veículos em rodovias de pista simples – e obteve-se as ferramentas necessárias para o desenvolvimento de uma rodovia virtual para simulador de direção. Após realizar experimentos com motoristas voluntários na rodovia virtual desenvolvida e coletar seus dados de desempenho de condução, foi possível identificar quais fatores viário-ambientais provocaram mudanças no comportamento do condutor na via. A aplicação de ferramentas de análise estatística permitiu não só identificar esses fatores como também analisar a interação entre eles e segurança viária.

Figura 1: Organização da dissertação



(fonte: elaborado pelo autor)

A Tabela 1 mostra a organização dos experimentos realizados e seus parâmetros: artigo resultante, variável resposta coletada, cenários simulados, ferramentas de análise utilizadas e existência de repetição do segmento experimental. Todos os cenários possuíam uma versão com e outra sem sinalização horizontal.

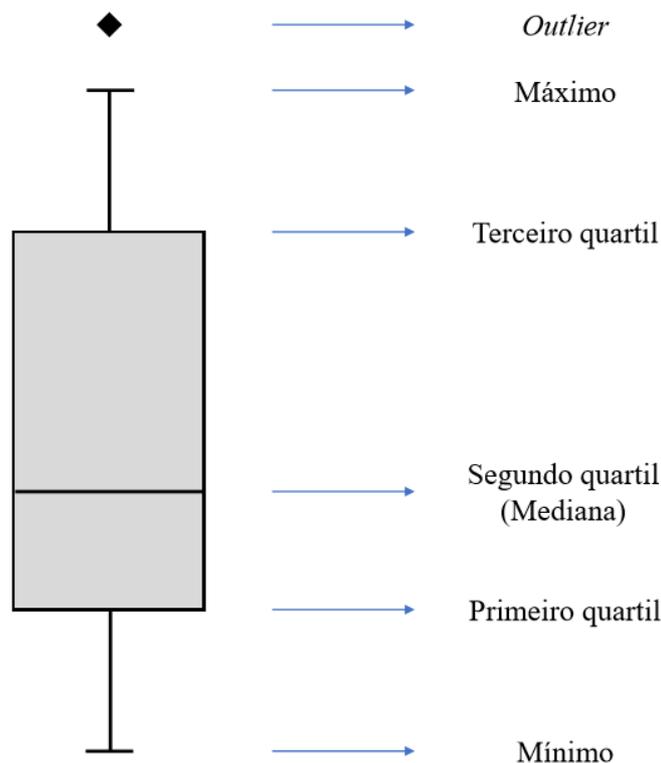
Tabela 1 – Organização dos experimentos

Experimento	Artigo	Variável resposta	Cenários	Ferramentas de análise	Repetição do trecho
1	1	velocidade	dia	teste t	sim
2	2 e 3	velocidade; posição lateral	dia e noite	análise de variância e coeficiente de variação	não

(fonte: elaborado pelo autor)

Ao longo do trabalho, alguns resultados das análises são apresentados em gráficos *boxplot* (diagrama de caixas). Essa categoria de gráfico permite que se visualize a variação dos dados observados por meio de quartis (Figura 2). Ao fim do trabalho são apresentadas as conclusões deste estudo, onde os objetivos propostos são avaliados, os principais resultados são retomados e sugestões são dadas para trabalhos futuros.

Figura 2: Estrutura de um *boxplot*



(fonte: elaborado pelo autor)

1.5 DELIMITAÇÕES DO TRABALHO

O estudo está delimitado a ambientes virtuais desenvolvidos para simuladores de direção imersivos. O experimento está delimitado a uma rodovia de pista simples sem defensas, com acostamento e com a presença de fluxo oposto composto tanto de veículos leves quanto de pesados. O veículo a ser conduzido pelos participantes é considerado como veículo de passeio.

1.6 LIMITAÇÕES DO TRABALHO

O presente estudo possui limitações relacionadas ao realismo do ambiente virtual desenvolvido para o simulador de direção, ao comportamento do participante durante o experimento e à obtenção de amostra. A fidelidade do ambiente virtual é restrita pelas características técnicas do *software* utilizado para desenvolvê-lo. O comportamento do participante pode ser menos condizente com a realidade devido ao nível de realismo do cenário virtual, às características técnicas do simulador de direção e por ele estar ciente de que está sendo observado. No segundo e no terceiro artigo, a amostra possui limitação na idade dos participantes devido à dificuldade de obter condutores idosos habilitados para dirigir e dispostos a participar do experimento.

1.7 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta dissertação foi desenvolvida em forma de artigos científicos e está estruturada em cinco capítulos. O primeiro capítulo introduz o trabalho, apresenta o tema, os objetivos e a justificativa, o método adotado, as delimitações, as limitações e a estrutura.

O segundo capítulo corresponde ao primeiro artigo da dissertação, para o qual dois cenários rodoviários virtuais são desenvolvidos para um simulador de direção imersivo. Nele se investigou o efeito que as linhas de centro e de bordo de uma rodovia provocam sobre a velocidade praticada por condutores. Inicialmente, realiza-se uma revisão da literatura sobre simuladores de direção, sobre sinalização rodoviária horizontal e sobre a relação entre velocidade e segurança viária. Para a execução do experimento são desenvolvidos dois cenários virtuais de um trecho rodoviário: um sem e outro com a presença das linhas de centro e de bordo na pista. Participantes são convidados a conduzir no trecho e têm suas velocidades coletadas automaticamente. Utiliza-se teste de hipóteses (teste t) para avaliar a significância de cada variável independente com a velocidade praticada.

O terceiro capítulo corresponde ao segundo artigo da dissertação, para o qual quatro cenários rodoviários virtuais são desenvolvidos para um simulador de direção imersivo. Neste a segurança viária é estudada por meio da velocidade praticada por condutores de duas faixas etárias ao se variar parâmetros do ambiente e de sinalização rodoviária horizontal – linhas de centro e de bordo – no cenário virtual. Primeiramente, revisa-se na literatura sobre

simuladores de direção e sobre as relações entre luminosidade do ambiente, presença das linhas de centro e de bordo, velocidade praticada e acidentes viários. Participantes conduzem no trecho e têm suas velocidades coletadas automaticamente. Os dados coletados são analisados por meio de análise de variância (ANOVA) e por coeficiente de variação.

O quarto capítulo corresponde ao terceiro e último artigo dissertação, no qual a segurança viária é analisada por meio da posição lateral praticada por condutores de duas faixas etárias ao se variar parâmetros do ambiente e de sinalização rodoviária horizontal – linhas de centro e de bordo – no cenário virtual. No início do artigo, encontra-se um referencial teórico sobre simuladores de direção e sobre as relações entre luminosidade do ambiente, presença das linhas de centro e de bordo, posição lateral e acidentes viários. Participantes conduzem nos mesmos cenários utilizados no segundo artigo, e suas posições laterais são coletadas automaticamente ao longo do percurso. Os dados coletados são analisados por meio de análise de variância (ANOVA) e por coeficiente de variação.

Por fim, o quinto capítulo apresenta as conclusões do trabalho. Neste os resultados obtidos de acordo com os objetivos são retomados, e recomendações para trabalhos futuros são apresentadas.

CAPÍTULO 2 – ARTIGO 1

EFEITO DAS LINHAS DE CENTRO E DE BORDO DE UMA RODOVIA SOBRE A VELOCIDADE PRATICADA POR CONDUTORES EM SIMULADOR DE DIREÇÃO IMERSIVO

Adaptado do artigo publicado nos anais do 32º ANPET – Congresso de Ensino e Pesquisa em Transportes

Maurício Castilhos de Oliveira

Christine Tessele Nodari

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Escola de Engenharia de Produção

RESUMO

Este artigo possui como objetivo estimar o efeito que as linhas de centro e de bordo de uma rodovia provocam sobre a velocidade praticada por condutores. Para isso foi utilizado um simulador de direção imersivo, o qual tem se mostrado adequado em pesquisas em segurança viária. O experimento deste estudo envolveu 24 participantes, sendo metade de cada gênero e subdivididos igualmente em três faixas etárias. Em relação às faixas etárias, os resultados da análise estatística indicaram que pessoas jovens tendem a conduzir mais rápido sem a presença das linhas de centro e de bordo, enquanto pessoas mais velhas tendem a dirigir mais velozmente quando as linhas de centro e de bordo estão presentes. Quanto ao gênero, mulheres conduziram mais rápido com a presença das linhas, enquanto homens dirigiram mais rápido sem a presença das linhas.

ABSTRACT

This article aims to estimate the effect that the centerline and edge lines of a highway cause on drivers' speed choice. For this, an immersive driving simulator was used, which has been shown to be suitable for road safety research. The experiment of this study involved 24 participants, half being of each gender and equally subdivided into three age groups. Regarding age groups, the results of the statistical analysis indicated that young people tend to

drive faster without the presence of centerline and edge lines, while older people tend to drive faster when centerline and edge lines are present. As for gender, women drove faster with the presence of the lines, while men drove faster without the presence of the lines.

1. INTRODUÇÃO

O uso de simuladores de direção em pesquisas em transportes tem sido crescente devido a algumas de suas características como versatilidade no estudo e no controle de variáveis de interesse e relação custo-benefício mais desejável quando comparado a pesquisas realizadas em campo. Avanços tecnológicos possibilitam a criação de ambientes virtuais mais fiéis à realidade, viabilizando a reprodução do comportamento do condutor de maneira semelhante às situações reais e oferecendo diversas oportunidades de investigação sobre melhorias da segurança viária.

Os avanços tecnológicos permitem que sejam estudadas situações difíceis de avaliar em campo devido a fatores relacionados à obtenção de amostra adequada e à coleta de dados em condições controladas, como níveis similares de luminosidade, e possibilitam o emprego de simuladores de direção imersivos – ferramentas que simulam um ambiente com alto nível de realismo por meio do uso de óculos de realidade virtual –, proporcionando aos condutores a sensação de estar presente no ambiente simulado. Dentre suas vantagens, também se destacam baixo custo de implantação, possibilidade de testar diferentes condições viárias sem colocar o condutor em risco, possibilidade de repetir os experimentos realizados e controle sobre o ambiente simulado por parte dos pesquisadores. Por outro lado, existe a limitação relatada na literatura como *simulator sickness*, que é o mal-estar provocado nos usuários expostos ao ambiente imersivo.

Os simuladores de direção oferecem ao pesquisador a possibilidade de avaliar parâmetros de norma e de projeto ou medidas de segurança viária existentes. Hauer (2018) questiona a presença de linhas de bordo na segurança viária, pois elas podem alterar o comportamento do condutor na via. Embora seja esperado que a sinalização horizontal – como linhas de centro e de bordo – seja pintada sobre o revestimento da pista consoante manuais de sinalização rodoviária, pois ela disciplina o uso da via e serve como referência para o condutor de maneira a tornar a condução mais segura, sua presença pode, segundo van Driel *et al.* (2004), provocar variações nas velocidades praticadas. Velocidades heterogêneas em uma rodovia, por sua vez, podem afetar diretamente a segurança viária (Islam *et al.*, 2013).

Este artigo possui como objetivo estimar o efeito que as linhas de centro e de bordo de uma rodovia provocam sobre a velocidade praticada por condutores. Este artigo está organizado em cinco seções incluindo esta. Na seção 2, encontra-se o referencial teórico sobre o tema estudado. A seção 3 apresenta o método, onde se encontra a descrição do equipamento, do cenário e das ferramentas utilizadas para análise dos dados. Na seção 4, localiza-se a discussão acerca dos resultados obtidos. Por fim, a seção 5 possui as considerações finais do estudo realizado.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Esta seção se destina a relatar o embasamento teórico a respeito do tema deste artigo e está dividida em duas subseções. A primeira aborda a utilização de simuladores de direção em estudos em transportes, e a segunda trata da função da sinalização horizontal e seu impacto na velocidade praticada em ambiente rodoviário.

2.1. Simuladores de direção em transportes

Simuladores de direção têm sido utilizados em diversos tipos de estudos como em análise de comportamento de condutores (Zoller *et al.*, 2017), de treinamento de condutores (Wu *et al.*, 2018), de interação com veículos autônomos (Al-Shihabi e Mourant, 2003), de percepção de sinalização (Larocca *et al.*, 2018), de projeto geométrico (Bella, 2015), de uso de álcool na condução (Vollrath e Fischer, 2017).

O uso de simuladores pode ser uma alternativa adequada comparado às pesquisas em campo, uma vez que estas são onerosas e possuem empecilhos na coleta de dados. Os simuladores são interativos, o que permite que sejam feitas modificações nas configurações do veículo ou do cenário com o objetivo de registrar os efeitos causados no comportamento do condutor em relação à sua velocidade, trajetória e frenagem (Bella, 2008; Bella, 2014). Sua principal vantagem em pesquisas em transportes é a possibilidade de estudar, em ambiente seguro, diversos fatores viário-ambientais que impactam no comportamento do condutor, sendo que a tecnologia associada a eles oferece a possibilidade de rápida troca da condição simulada (Blana, 1996). É possível ainda aumentar o poder estatístico do estudo por ser viável a obtenção de uma amostra grande de condutores, o planejamento de cenários com diferenças mais salientes e o controle de fatores não relacionados ao estudo, mas que influenciam no comportamento do condutor (Reinhard *et al.*, 2018).

Os simuladores de direção podem ser do tipo imersivo, os quais possuem algumas vantagens em relação aos de projeção em tela plana. Mourant e Schultheis (2001) citam que o condutor apenas precisa de um volante e dos pedais ao utilizar óculos de imersão, logo o espaço físico ocupado pelo equipamento é menor. Adicionalmente, o condutor possui uma visão de 360 graus e a sensação de estar presente dentro do cenário virtual, o que possibilita a execução de situações realísticas.

O uso de simuladores de direção imersivos, no entanto, possui uma limitação importante: a possibilidade de provocar sintomas de mal-estar (*simulator sickness*) nos usuários. Na literatura, alguns fatores são relacionados à suscetibilidade aos sintomas como idade da pessoa (Brooks *et al.*, 2010; Bélanger *et al.*, 2010), exposição a ambientes virtuais no passado (Domeyer *et al.*, 2013; Kennedy *et al.*, 2000), instabilidade postural (Smart *et al.*, 2002) e gênero da pessoa (Classen *et al.*, 2011). De modo a avaliar a possível sensação de mal-estar nos condutores, Nodari *et al.* (2017) realizaram um estudo em simulador de direção imersivo e concluíram que um período de condução de aproximadamente oito minutos provocou sintomas leves e moderados, sendo vista cansada, cabeça pesada, cansaço, vertigem e náusea os mais frequentes.

2.2. Sinalização horizontal, velocidade praticada e acidentes em rodovias

Algumas propriedades das rodovias como a sinalização horizontal (marcas sobre seu revestimento) podem servir tanto como instrução para o condutor quanto como um guia para seu comportamento, propiciando segurança e conforto (Charlton, 2007; DNIT, 2010; Elliott *et al.*, 2003; Weller *et al.*, 2008). A sinalização horizontal deve fornecer, constantemente, informação sobre a posição do centro e do bordo da pista e, como elas são percebidas pela visão periférica, essa informação é recebida sem que o condutor tire seus olhos da pista (Zwahlen e Schnell, 1999).

Acredita-se que a presença de linhas de centro e de bordo possui potencial para reduzir a ocorrência de acidentes em até 20% (Miller, 1992). Por outro lado, Fildes *et al.* (1987) e Willis *et al.* (1984) mostram que as linhas de bordo não têm influência na redução da velocidade praticada por condutores. Em alguns casos, constatou-se que a presença de linhas de bordo resultou em um aumento da velocidade praticada (Ranney e Gawron, 1986).

Como altas velocidades tendem a estar associadas ao aumento tanto da severidade quanto da frequência de acidentes (Elvik, 2013; Nilsson, 2004), o papel das linhas de centro e de bordo na provisão de ambientes viários seguros torna-se suscetível a questionamentos (Hauer, 2018). Adicionalmente, a variabilidade da velocidade pode aumentar o risco de acidentes e diminuir a eficiência da rede viária (Garber e Ehrhart, 2000; van Nes *et al.*, 2010).

Musick (1962, *apud* Hauer, 2018) e Basile (1962, *apud* Hauer, 2018) avaliaram o efeito das primeiras implantações de linhas de bordo em trechos rodoviários nos Estados Unidos em relação ao número de acidentes. Os dois estudos concluíram que o número de acidentes havia reduzido em acessos, embora o motivo não tenha ficado claro, uma vez que não há linhas de bordo nesses pontos. Os dois estudos, entretanto, também concluíram que o número de acidentes nos segmentos entre os pontos de acesso havia sido maior que o esperado se não houvesse linhas de bordo.

Outros tipos de sinalização horizontal têm sido usados de maneira a reduzir a velocidade dos veículos em locais de interesse (Denton, 1980; Fildes e Jarvis, 1994; Godley *et al.*, 1999). Uma medida utilizada em vias rurais é a redução progressiva do espaçamento das linhas tracejadas conforme a redução do limite de velocidade, de modo a gerar uma sensação de alta velocidade ao condutor (Herrstedt, 2006).

A sinalização horizontal, portanto, pode ser usada para alterar a velocidade dos veículos de duas formas distintas: a primeira atraindo a atenção dos condutores e fornecendo informações sobre diferentes situações do ambiente viário, e a segunda interferindo na percepção dos condutores em relação à sua própria velocidade (Charlton *et al.*, 2018).

3. MÉTODO

Esta seção evidencia as diretrizes do estudo realizado. É apresentado o simulador de direção utilizado, o cenário desenvolvido para o estudo, os participantes pesquisados, os tipos de dados coletados e os procedimentos adotados na realização do experimento.

3.1. Simulador de direção

O simulador de direção empregado na pesquisa foi do tipo imersivo. A imersão é factível devido à utilização de óculos de realidade virtual e fones de ouvido circo auricular para isolar

a pessoa do ambiente real. Neste simulador, o *cockpit* é montado sobre uma plataforma dinâmica capaz de reproduzir as forças atuantes no veículo (Figura 1).



Figura 1: Simulador de direção imersivo

Para este estudo, o veículo foi configurado com câmbio automático para facilitar e uniformizar a condução entre os participantes. O equipamento possuía volante e pedais de acelerador e de freio compatíveis com os usados em veículos de passeio.

3.2. Cenário do estudo

O cenário de estudo foi um trecho rodoviário virtual elaborado na plataforma Unity. O trecho é composto por um segmento com extensão aproximada de 2500 metros de pista dupla em reta destinado à adaptação do condutor ao equipamento. Na sequência do trecho ocorre a transição para o segmento experimental propriamente dito. Nele é apresentado ao condutor um cenário rodoviário de pista simples em relevo ondulado com sucessão de trechos curvos e retilíneos e com aproximadamente 3200 metros de extensão. Foram desenvolvidos dois cenários nessas condições: um com linhas de centro e de bordo durante toda extensão e outro sem nenhuma linha durante toda extensão (Figura 2).



Figura 2: Ilustração dos cenários com e sem linhas de centro e de bordo

As larguras da faixa e do acostamento eram de 4 e 3 metros respectivamente, e não havia defensas em nenhuma parte do trecho. Havia tráfego no sentido contrário composto tanto de veículos leves quanto de pesados, no entanto não havia tráfego no sentido em que o participante conduzia, sendo desnecessária manobras como ultrapassagem.

3.3. Participantes

A amostra deste estudo foi definida a partir de um projeto de experimentos e consistiu de 24 pessoas, sendo metade de cada gênero e subdividida igualmente em três faixas etárias (“menor que 30 anos”, “entre 31 e 60 anos” e “maior que 61 anos”). A divisão das faixas etárias foi definida com base nos preços dos seguros automotivos, para mantê-las homogêneas quanto ao estilo de condução. Exigiu-se que cada pessoa cumprisse três requisitos para participar: (i) possuir Carteira Nacional de Habilitação há mais de um ano; (ii) conduzir pelo menos 3 vezes por semana; e (iii) ser habituado a conduzir em trechos rodoviários.

3.4. Coleta de dados

Os dados coletados estão divididos em dois grupos: características do condutor (idade e gênero) e desempenho de condução (velocidade em quilômetros por hora a cada estaca de 20 metros do trecho experimental).

3.5. Procedimentos adotados na realização do experimento

Não foi realizado teste piloto nos cenários desenvolvidos. Inicialmente, cada participante preenchia um questionário onde informava sua idade e seu gênero e assinava um termo de consentimento relativo à sua participação no experimento. Em seguida, ele era conduzido até o equipamento e posicionado no simulador enquanto recebia as instruções básicas sobre seu uso. A partir desse momento, o participante iniciava a condução pelo segmento destinado à

sua adaptação ao simulador sem ter sua velocidade coletada até o momento de transição para o segmento experimental. Ao ingressar no segmento experimental, o período de avaliação iniciava efetivamente e a velocidade praticada era registrada a cada 20 metros.

A fim de se avaliar a adaptação do comportamento frente a situações repetidas, o cenário do segmento experimental se repetia em sua totalidade após o condutor percorrer 3200 metros. O tempo total de condução estudado neste experimento variou para cada participante em função da sua velocidade, sendo considerado o tempo necessário para um completar duas vezes o percurso de 3200 metros do segmento experimental proposto.

4. RESULTADOS

A amostra pesquisada consistiu de 24 participantes voluntários, sendo a idade do participante mais jovem de 21 anos e do mais velho de 78 anos. A média e o desvio-padrão da idade foram de 47,92 anos e de 19,73 anos respectivamente. O tempo total de condução para cada participante foi de aproximadamente seis minutos – período de exposição a ambiente imersivo associado à baixa intensidade de sintomas de mal-estar conforme Nodari *et al.* (2017).

Os dados de velocidade coletados a cada 20 metros do segmento experimental foram analisados para investigar o impacto das variáveis controladas no estudo sobre a velocidade praticada pelos condutores pesquisados. Foram realizadas as seguintes análises: (i) perfil de velocidade de cada faixa etária para os cenários com e sem linhas; (ii) perfil de velocidade ao longo de todo o trecho (avaliação da repetição do segmento experimental); e (iii) perfil de velocidade de cada gênero para os cenários com e sem linhas.

A Figura 3 ilustra o perfil de velocidade de cada faixa etária nos cenários “sem linhas de centro e de bordo” e “com linhas de centro e de bordo”. A linha vertical vermelha indica o momento no qual o cenário do segmento experimental começava a se repetir. A Figura 4 apresenta o perfil de velocidade praticado pelos condutores da faixa etária “menor que 30 anos” nos cenários com e sem linhas. É possível notar que os participantes dessa faixa etária que conduziram sem a presença das linhas praticaram velocidades superiores aos que conduziram com a presença das linhas durante quase a totalidade do percurso.

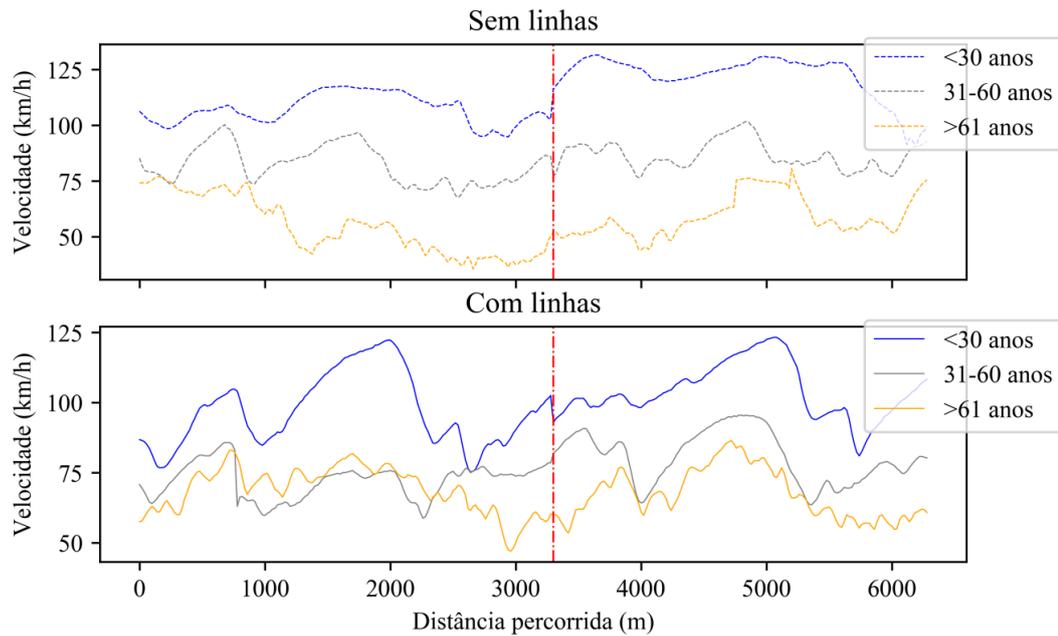


Figura 3: Perfil de velocidade de cada faixa etária nos cenários com e sem linhas

Adicionalmente, percebe-se que, para os menores de 30 anos, as diferenças de velocidade entre os cenários com e sem linhas são maiores na segunda metade do gráfico, trecho que corresponde à repetição do cenário experimental.

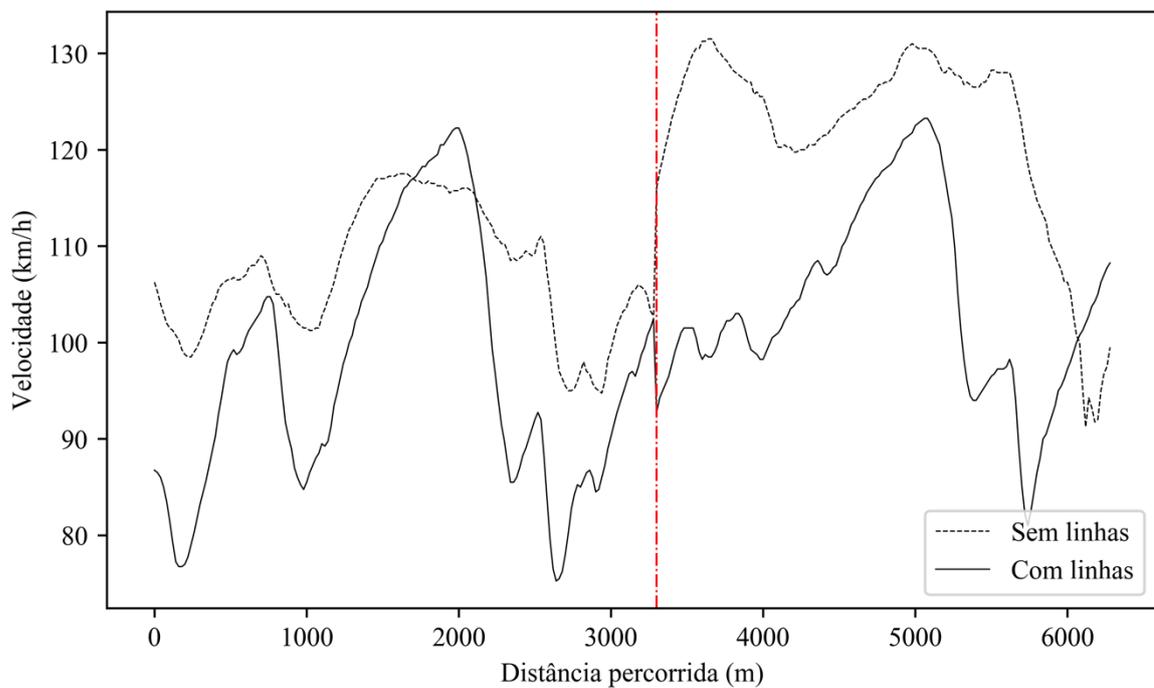


Figura 4: Perfil de velocidade da faixa etária “menor que 30 anos”

Na Figura 5, encontra-se o perfil de velocidade da faixa etária “entre 31 e 60 anos”. Neste gráfico, percebe-se um padrão semelhante ao da Figura 4 no primeiro segmento do percurso: velocidades superiores no cenário sem as linhas de centro e de bordo. No segundo segmento, contudo, diferentemente do apresentado na Figura 4, as diferenças de velocidade se tornam menores quando os participantes conduziram pela segunda vez no mesmo percurso (repetição do cenário experimental).

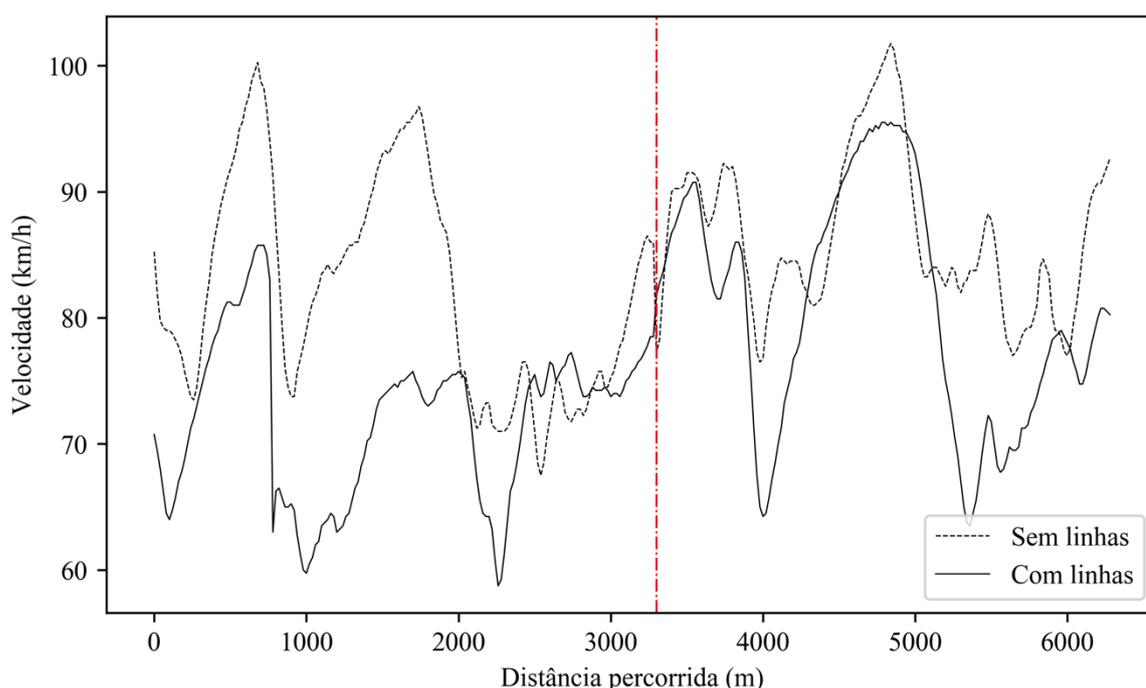


Figura 5: Perfil de velocidade da faixa etária “entre 31 e 60 anos”

Na Figura 6 está apresentado o perfil de velocidade da faixa etária “maior que 61 anos”. Para esta faixa etária, os condutores praticaram velocidades maiores nos cenários com a presença das linhas de centro e de bordo durante quase a totalidade do percurso – situação diferente daquelas que ocorreram com as outras duas faixas etárias analisadas.

A análise estatística dos resultados obtidos foi realizada por meio de teste t, o qual foi aplicado tanto com duas amostras diferentes, quanto com cada amostra pareada. Na primeira aplicação, avaliou-se a significância da diferença de velocidade média entre as situações “sem linhas” e “com linhas” no primeiro segmento do percurso; na segunda aplicação, avaliou-se a significância da diferença de velocidades entre o primeiro e o segundo segmento para as situações “sem linhas” e “com linhas” individualmente.

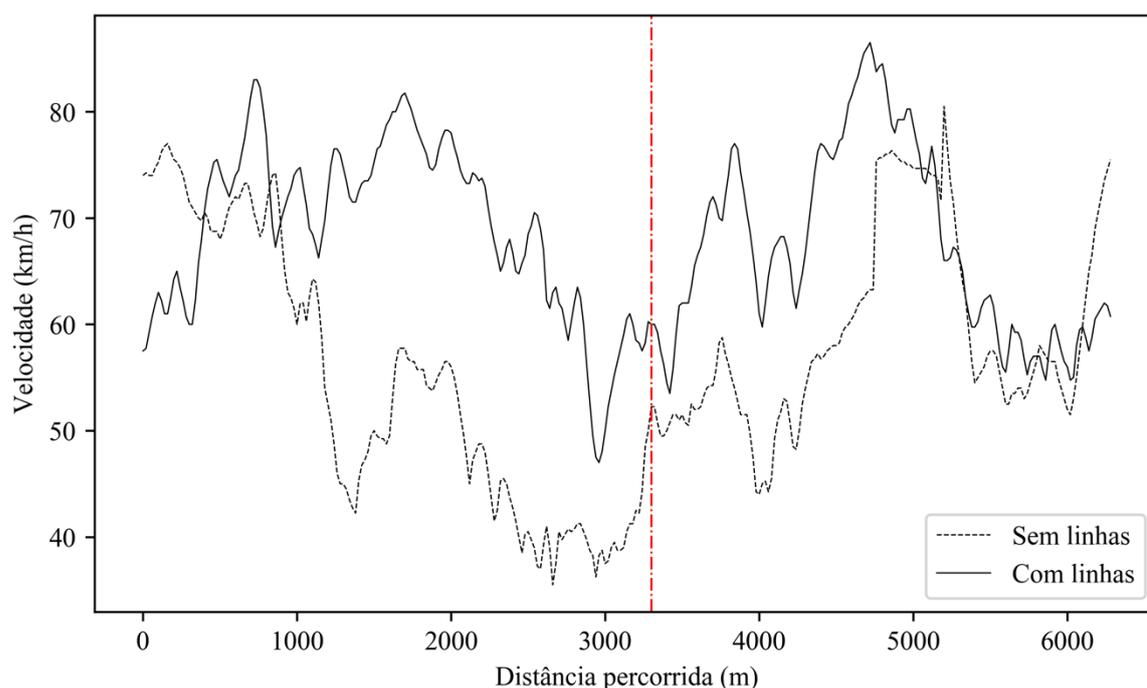


Figura 6: Perfil de velocidade da faixa etária “maior que 61 anos”

Para todas as faixas etárias, a análise por teste t indicou que houve diferença significativa em relação às velocidades médias entre as situações “sem linhas de centro e de bordo” e “com linhas de centro e de bordo”. O resumo dessa análise pode ser visualizado na Tabela 1, onde “M” indica média e “DP” indica desvio-padrão.

Tabela 1: Resumo da análise estatística para as faixas etárias sem a repetição do segmento

Faixa etária	Variável		Sem linhas (n=160)	Com linhas (n=160)	t	p-valor
menor que 30 anos	velocidade média	M	107,31	96,78	8,83	<0,001
	(km/h)	DP	6,86	13,28		
entre 31 e 60 anos	velocidade média	M	81,89	71,80	11,70	<0,001
	(km/h)	DP	8,74	6,34		
maior que 61 anos	velocidade média	M	55,03	69,46	-11,80	<0,001
	(km/h)	DP	13,03	8,05		

A avaliação das velocidades antes e depois da repetição do cenário experimental consistiu de 6 combinações (as situações com e sem linhas de centro e de bordo para cada uma das 3 faixas etárias). Em 5 delas, a velocidade média foi maior quando os participantes dirigiram na segunda seção do percurso, exceto para a faixa etária “maior que 61 anos” no cenário com a

presença das linhas, no qual houve uma leve redução da velocidade média. Em todos os casos, entretanto, a hipótese nula de que as médias das velocidades eram iguais foi rejeitada.

Observa-se que pessoas jovens tendem a conduzir mais rápido quando não há linhas de centro e de bordo; tendência que, aparentemente, inverte conforme o aumento da idade. Essa situação pode ser visualizada de maneira mais elucidativa por meio do gráfico *boxplot* apresentado na Figura 7. É possível que esse fenômeno possa ser explicado por fatores comportamentais, de modo que os jovens podem se sentir mais livres ao perceberem que possuem mais espaço quando a pista não possui linhas, resultando em aumento da velocidade praticada.

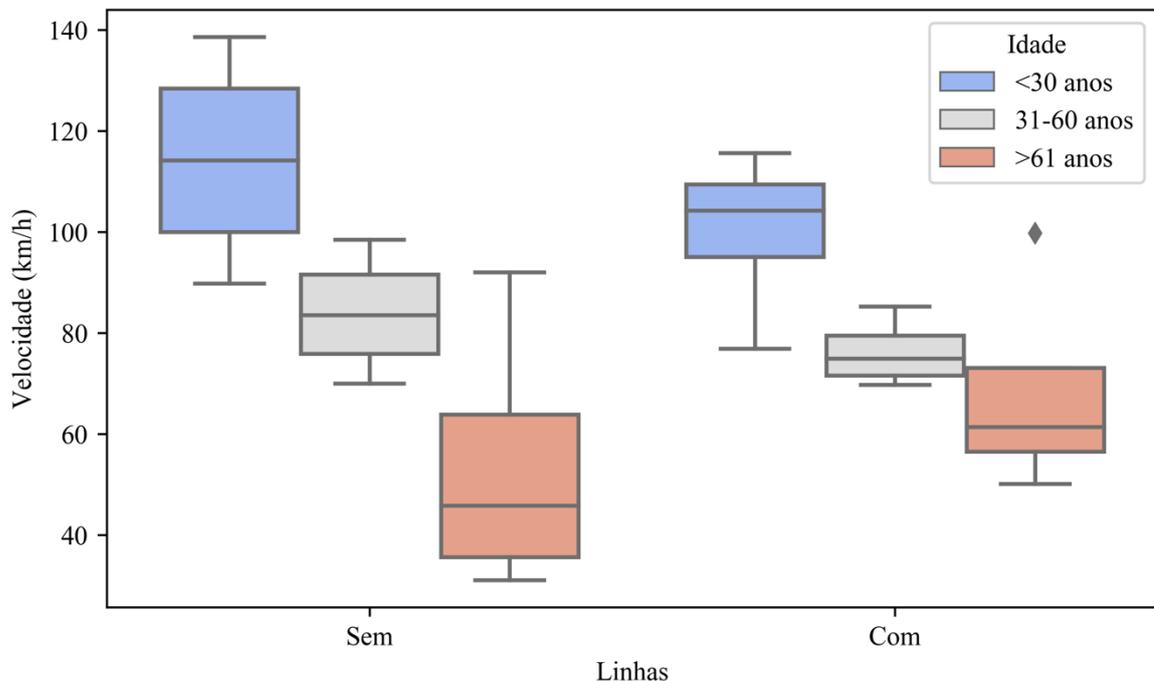


Figura 7: *Boxplot* da velocidade em função das linhas e da idade

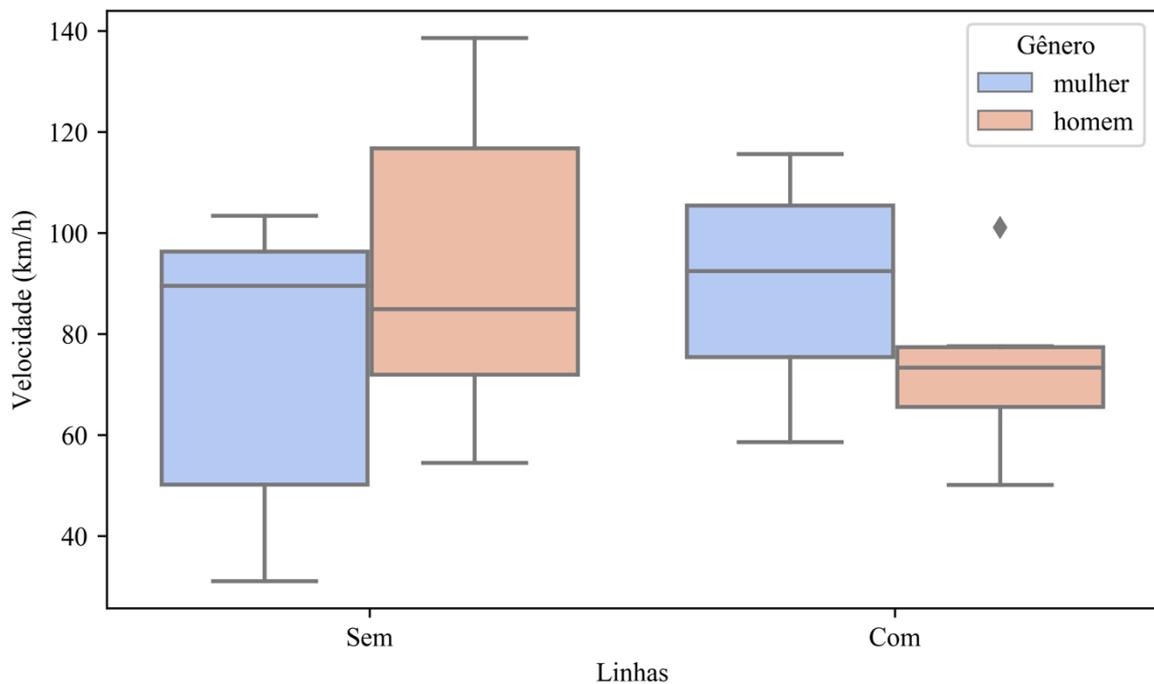
Fatores comportamentais também podem explicar a tendência ao aumento da velocidade média praticada quando os condutores dirigiram pela segunda vez no segmento experimental. O conhecimento prévio do projeto geométrico aparentou ser um fator importante na tomada de decisão sobre a velocidade considerada adequada pelo condutor. A análise estatística também indicou que houve diferença significativa da velocidade média entre “sem linhas de centro e de bordo” e “com linhas de centro e de bordo” para os gêneros. O resumo dessa análise está evidenciado na Tabela 2.

Tabela 2: Resumo da análise estatística para os gêneros sem a repetição do segmento

Gênero	Variável		Sem linhas (n=160)	Com linhas (n=160)	t	p-valor
mulher	velocidade média (km/h)	M	71,22	87,95	-23,01	<0,001
		DP	5,33	7,39		
homem	velocidade média (km/h)	M	91,60	70,74	20,20	<0,001
		DP	10,44	7,65		

A avaliação das velocidades antes e depois da repetição do cenário experimental consistiu de 4 combinações (as situações com e sem linhas para cada um dos gêneros). Em todos os casos, a hipótese nula de que as médias das velocidades eram iguais foi rejeitada.

A Figura 8 apresenta o gráfico de *boxplot* da velocidade em função da presença das linhas de centro e de bordo e do gênero. É possível verificar que mulheres praticaram velocidades maiores no cenário com a presença das linhas do que no cenário sem as linhas. Os homens, por outro lado, dirigiram mais rápido no cenário sem a presença das linhas. Ainda se nota que, embora a velocidade média das mulheres no cenário sem linhas tenha sido menor que a dos homens, a mediana foi maior. No cenário com linhas, tanto a velocidade média quanto a mediana dos homens foram menores que das mulheres.

**Figura 8:** *Boxplot* da velocidade em função das linhas e do gênero

Dado que altas velocidades estão associadas ao aumento tanto da severidade quanto da frequência de acidentes (Elvik, 2013; Nilsson, 2004), os resultados encontrados neste estudo sugerem que ambientes rodoviários sem linhas de centro e de bordo podem ser mais perigosos para homens, enquanto ambientes rodoviários com linhas de centro e de bordo podem ser mais perigosos para mulheres.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve por objetivo estimar o efeito que as linhas de centro e de bordo de uma rodovia provocam sobre a velocidade praticada por condutores. Para isso foram desenvolvidas, para um simulador de direção imersivo, duas versões de um cenário rodoviário virtual: uma sem linhas de centro e de bordo e outra com as linhas. Cada versão possuía dois segmentos, sendo o primeiro de adaptação com aproximadamente 2500 metros, e o segundo o experimental com aproximadamente 3200 metros (que se repetia para avaliar a adaptação do comportamento dos condutores).

Para atender ao objetivo deste artigo, uma amostra de 24 participantes, sendo metade de cada gênero e subdividida igualmente por faixa etária (“menor que 30 anos”, “entre 31 e 60 anos” e “maior que 61 anos”), foi submetida à condução nos cenários desenvolvidos. Cada participante conduziu apenas em uma das versões por um tempo aproximado de seis minutos. Com os dados coletados das velocidades de cada condutor no segmento experimental, foram realizadas análises estatísticas a fim de verificar se havia diferença significativa entre a condução nos cenários “sem linhas de centro e de bordo” e “com linhas de centro e de bordo” para cada grupo avaliado. Entre os resultados, destacam-se:

- Pessoas de até 30 anos conduziram 10,9% mais rápido em situações sem a presença das linhas de centro e de bordo;
- Pessoas entre 31 e 60 anos dirigiram 14,1% mais rápido em situações sem a presença das linhas;
- Pessoas com mais de 61 anos conduziram 26,2% mais rápido quando as linhas de centro e de bordo estavam presentes;
- As três faixas etárias apresentaram aumento de velocidade média no trecho repetido, exceto o grupo “maiores que 61 anos” no cenário com linhas;
- Mulheres praticaram velocidade média 23,5% superior no cenário com linhas do que

no sem linhas;

- Homens praticaram velocidade média 29,5% superior no cenário sem linhas do que no com linhas;
- No cenário sem linhas, homens conduziram 28,6% mais rápido que mulheres;
- No cenário com linhas, mulheres conduziram 24,3% mais rápido que homens.

A velocidade média praticada no trecho experimental estudado foi maior quanto menos idade o condutor possuía para as situações com e sem linhas de centro e de bordo na pista. Esse resultado sugere que a idade da pessoa pode estar relacionada a diferentes percepções de risco. Adicionalmente, homens optaram por conduzir mais rápido quando as linhas não estavam presentes, enquanto mulheres conduziram com maiores velocidades quando as linhas estavam presentes, o que fortalece a discussão feita por Hauer (2018), na qual medidas de segurança viária não devem ser realizadas baseadas apenas em opinião.

Agradecimentos

Os autores agradecem às empresas MO3 e BS Motion e à equipe do VizLab/UNISINOS pelo apoio na realização do experimento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Al-Shihabi, T. e R. R. Mourant (2003) Toward More Realistic Driving Behavior Models for Autonomous Vehicles in Driving Simulators. *Transportation Research Record*, v. 1843, p. 41-49.
- Bélanger, A.; S. Gagnon e S. Yamin (2010) Capturing the Serial Nature of Older Drivers' Responses Towards Challenging Events: A Simulator Study. *Accident Analysis and Prevention*, v. 42, p. 809-817.
- Bella, F. (2008) Driving Simulator for Speed Research on Two-Lane Rural Roads. *Accident Analysis and Prevention*, v. 40, p. 1078-1087.
- Bella, F. (2014) Driver Perception Hypothesis: Driving Simulator Study. *Transportation Research Part F*, v. 24, p. 183-196.
- Bella, F. (2015) Coordination of Horizontal and Sag Vertical Curves on Two-Lane Rural Roads: Driving Simulator Study. *International Association of Traffic and Safety Sciences (LATSS)*, v. 39, p. 51-57.
- Blana, E. (1996) Driving Simulator Validation Studies: A Literature Review. Working Paper 480. Institute of Transport Studies, University of Leeds, UK.

- Brooks, J. O.; R. R. Goodenough; M. C. Crisler; N. D. Klein; R. L. Alley; B. L. Koon; W. C. Logan Jr.; J. H. Ogle; R. A. Tyrrell e R. F. Wills (2010) Simulator Sickness During Driving Simulation Studies. *Accident Analysis and Prevention*, v. 42, p. 788-796.
- Charlton, S. G. (2007) Delineation Effects in Overtaking Lane Design. *Transportation Research Part F*, v. 10, p. 153-163.
- Charlton, S. G.; N. J. Starkey e N. Malhotra (2018) Using Road Markings as a Continuous Cue for Speed Choice. *Accident Analysis and Prevention*, v. 117, p. 288-297.
- Classen, S.; M. Bewernitz e O. Shechtman (2011) Driving Simulator Sickness: An Evidence-Based Review of the Literature. *American Journal of Occupational Therapy*, v. 65, p. 179-188.
- Denton, G. G. (1980) The Influence of Visual Pattern on Perceived Speed. *Perception*, v. 9, p. 393-402.
- DNIT (2010) Manual de Sinalização Rodoviária. Ministério dos Transportes, Rio de Janeiro.
- Domeyer, J. E.; N. D. Cassavaugh e R. W. Backs (2013) The Use of Adaptation to Reduce Simulator Sickness in Driving Assessment and Research. *Accident Analysis and Prevention*, v. 53, p. 127-132.
- Elliott, M. A.; V. A. McColl e J. V. Kennedy (2003) Road Design Measures to Reduce Drivers' Speed via Psychological Processes: A Literature Review. TRL Report TRL564.
- Elvik, R. (2013) A Re-Parameterisation of the Power Model of the Relationship Between the Speed of Traffic and the Number of Accidents and Accident Victims. *Accident Analysis and Prevention*, v. 50, p. 854-860.
- Fildes, B. N.; M. R. Fletcher e J. McM. Corrigan (1987) Speed Perception 1: Drivers' Judgements of Safety and Speed on Urban and Rural Straight Roads. Report CR 54. Federal Office of Road Safety. Canberra, Australia.
- Fildes B. N. e J. R. Jarvis (1994) Perceptual Countermeasures: Literature Review. Report CR4/94. Monash University Accident Research Centre. Clayton, Victoria.
- Garber, N. J. e A. A. Ehrhart (2000) Effect of Speed, Flow, and Geometric Characteristics on Crash Frequency for Two-Lane Highways. *Transportation Research Record*, v. 1717, p. 76-83.
- Godley, S.; B. Fildes; T. Triggs e L. Brown (1999) Perceptual Countermeasures: Experimental Research. Report CR 182. Monash University Accident Research Centre. Clayton, Victoria.
- Hauer, E. (2018) Road Safety Research and Practice: Problems of Coexistence. Disponível

em:

<https://www.researchgate.net/profile/Ezra_Hauer/publication/322775312_Road_safety_research_and_practice_problems_of_coexistence/links/5a6f85e1458515015e61643b/Road-safety-research-and-practice-problems-of-coexistence.pdf>. Acesso em: 05 jul. 2018.

- Herrstedt, L. (2006) Self-Explaining and Forgiving Roads – Speed Management in Rural Areas. *Proceedings of Research into Practice*. Canberra, Australia.
- Islam, M. T.; M. Hadiuzzaman; J. Fang; T. Z. Qiu e K. El-Basyouny (2013) Assessing Mobility and Safety Impacts of a Variable Speed Limit Control Strategy. *Transportation Research Record*, v. 2364, p. 1-11.
- Kennedy, R. S.; K. M. Stanney e W. P. Dunlap (2000) Duration and Exposure to Virtual Environments: Sickness Curves During and Across Sessions. *Presence*, v. 9, p. 463-472.
- Larocca, A. P. C.; R. L. Ribeiro; A. C. Figueira; P. T. M. S. de Oliveira; L. C. Lulio e M. A. C. Rangel (2018) Analysis of Perception of Vertical Signaling of Highways by Drivers in a Simulated Driving Environment. *Transportation Research Part F*, v. 58, p. 471-487.
- Miller, T. R. (1992) Benefit-Cost Analysis of Lane Marking. *Transportation Research Record*, v. 1334, p. 38-45.
- Mourant, R. R. e M. T. Schultheis (2001) A HMD Based Virtual Reality Driving Simulator. *Proceedings of the First International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design*. Aspen, USA.
- Nilsson, G. (2004) Traffic Safety Dimensions and the Power Model to Describe the Effect of Speed on Safety. Doctoral Thesis. Department of Technology and Society, Lund Institute of Technology, Sweden.
- Nodari, C. T.; M. C. de Oliveira; M. R. Veronez; F. Bordin; L. Gonzaga Jr.; A. P. C. Larocca e C. Framarim (2017) Avaliação do Realismo e da Sensação de Mal-Estar (Simulator Sickness) no Uso de Simulador Imersivo de Direção. *Anais do XXXI Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, ANPET, Recife, v. 1, p. 3103-3115.
- Ranney, T. A. e V. J. Gawron (1986) The Effects of Pavement Edgelines on Performance in a Driving Simulator Under Sober and Alcohol-Dosed Conditions. *Human Factors*, v. 28(5), p. 511-525.
- Reinhard, R. T.; M. Kleer e K. Drebler (2018) The Impact of Individual Simulator Experiences on Usability and Driving Behavior in a Moving Base Driving Simulator.

Transportation Research Part F, in press.

- Smart, L. J.; T. A. Stoffregen e B. G. Bardy (2002) Visually Induced Motion Sickness Predicted by Postural Instability. *Human Factors*, v. 44, p. 451-465.
- van Driel, C. J. G.; R. J. Davidse e M. F. A. M. van Maarseveen (2004) The Effects of an Edgeline on Speed and Lateral Position: A Meta-Analysis. *Accident Analysis and Prevention*, v. 36, p. 671-682.
- van Nes, N.; S. Brandenburg e D. Twisk (2010) Improving Homogeneity by Dynamic Speed Limit Systems. *Accident Analysis and Prevention*, v. 42, p. 944-952.
- Vollrath, M. e J. Fischer (2017) When Does Alcohol Hurt? A Driving Simulator Study. *Accident Analysis and Prevention*, v. 109. p. 89-98.
- Weller, G.; B. Schlag; T. Friedel e C. Rammin (2008) Behaviourally Relevant Road Categorisation: A Step Towards Self-Explaining Rural Roads. *Accident Analysis and Prevention*, v. 40, p. 1581-1588.
- Willis, P. A.; P. P. Scott e J. W. Barnes (1984) Road Edgeline and Accidents: An Experiment in South-West England. TRRL Laboratory Report 1117. Transport and Road Research Laboratory. Crowthorne, Berkshire.
- Wu, Y.; X. Zhao; J. Rong e Y. Zhang (2018) The Effectiveness of Eco-Driving Training for Male Professional and Non-Professional Drivers. *Transportation Research Part D*, v. 59, p. 121-133.
- Zoller, I.; B. Abendroth e R. Bruder (2017) Driver Behaviour Validity in Driving Simulators – Analysis of the Moment of Initiation of Braking at Urban Intersections. *Transportation Research Part F*, in press.
- Zwahlen, H. T. e T. Schnell (1999) Visibility of Road Markings as a Function of Age, Retroreflectivity Under Low-Beam and High-Beam Illumination at Night. *Transportation Research Record*, v. 1692, p. 152-163.

CAPÍTULO 3 – ARTIGO 2

ANÁLISE DA VELOCIDADE PRATICADA SOB UMA PERSPECTIVA DE SEGURANÇA VIÁRIA: ESTUDO EM SIMULADOR DE DIREÇÃO IMERSIVO

Maurício Castilhos de Oliveira

Christine Tessele Nodari

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Escola de Engenharia de Produção

RESUMO

Os acidentes de trânsito podem ser considerados um problema de saúde pública global. Como os fatores viário-ambiental e humano estão entre as causas desses acidentes, este artigo tem como objetivo avaliar o efeito que a luminosidade do ambiente e a presença das linhas de centro e de bordo provocam sobre a velocidade praticada por condutores. Para isso foi utilizado um simulador de direção imersivo. O estudo realizado envolveu 32 condutores voluntários de diferentes idades e gêneros determinados a partir de um projeto de experimentos fatorial 2^k . A única interação de primeira ordem que influenciou na velocidade praticada foi a variável independente gênero, e a interação de terceira ordem entre as variáveis gênero, idade e luminosidade também demonstrou possuir efeito estatisticamente significativo sobre a velocidade praticada. O cenário noturno comparado com o diurno e o cenário com a presença das linhas de centro e de bordo comparado com aquele sem a presença delas possuíram maior dispersão de velocidade.

ABSTRACT

Road traffic accidents may be considered a global public health problem. Since road-environmental and human factors are among the causes of these accidents, this article aims to evaluate the effect that the ambient light and the presence of the centerline and edge lines cause on drivers' speed choice. For this, an immersive driving simulator was used. The study involved 32 volunteer drivers of different ages and gender determined from a 2^k factorial experiment design. The only first order interaction that influenced the speed choice was the independent variable gender, and the third order interaction between the variables gender, age

and ambient light was also shown to have a statistically significant effect on the speed choice. The nighttime scenario compared to daytime and the scenario with the presence of the centerline and edge lines compared to the one without them had greater speed dispersion.

1. INTRODUÇÃO

Segurança viária pode ser considerada um assunto de saúde pública global, pois as mortes de trânsito ainda são responsáveis por mais de um milhão de óbitos a cada ano (WHO, 2018). Os motivos desses acidentes podem ser diversos e incluem fatores associados à via como a sinalização e ao ambiente como a luminosidade. Acredita-se que mudanças nesses fatores podem influenciar no comportamento do motorista na via. Summala (1996) discute um modelo comportamental que supõe que cada motorista possui uma margem de segurança quando está conduzindo, e seu comportamento é ajustado quando essa margem é excedida por algum motivo. Desta forma, o motorista pode adaptar seus parâmetros de condução – como a velocidade – como uma tentativa de voltar à margem de segurança. Entretanto, alterações na velocidade média e na variabilidade da velocidade praticada podem impactar na segurança viária.

A velocidade praticada por motoristas em rodovias tem um papel importante no gerenciamento e controle de tráfego, pois ela é um fator determinante no número e na frequência de acidentes (National Research Council, 2010). A mudança na velocidade pode impactar na segurança viária, pois altas velocidades tendem a estar associadas ao aumento tanto da severidade quanto da frequência de acidentes (Elvik, 2013; Elvik, 2019; Nilsson, 2004). Velocidades heterogêneas em uma rodovia podem afetar diretamente a segurança viária (Islam *et al.*, 2013), e a variabilidade da velocidade pode tanto aumentar o risco de acidentes quanto diminuir a eficiência da rede viária (Garber e Ehrhart, 2000; van Nes *et al.*, 2010). Em virtude de alguns aspectos viário-ambientais – como a presença das linhas de centro e de bordo na pista – impactarem na velocidade e na variação da velocidade praticada durante a condução em rodovias (Miller, 1992; Fildes *et al.*, 1987; Ranney e Gawron, 1986), é importante investigá-los em favor de melhorias na segurança viária.

Neste artigo é apresentado um estudo realizado em ambiente virtual imersivo, no qual foi avaliada a velocidade praticada pelos condutores em cenários rodoviários com diferentes níveis de luminosidade e com e sem a presença das linhas de centro e de bordo. O estudo possui como objetivo estimar o efeito que a luminosidade do ambiente e a presença das linhas

de centro e de bordo de uma rodovia provocam sobre a velocidade e relacionar esse efeito com o gênero e a idade dos condutores. Este artigo está organizado em cinco seções incluindo esta. Na seção 2, encontra-se o referencial teórico sobre o tema estudado. A seção 3 apresenta o método, onde se encontram informações sobre o equipamento, sobre o cenário, sobre o projeto de experimentos e sobre as ferramentas empregadas para analisar os dados. A seção 4 apresenta a discussão acerca dos resultados obtidos. Por fim, a seção 5 possui as considerações finais do estudo realizado.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Esta seção se destina a relatar o embasamento teórico a respeito do tema deste artigo e está dividida em três subseções. A primeira aborda o emprego de simuladores de direção em estudos em transportes, a segunda trata da condução em diferentes níveis de luminosidade e da função da sinalização horizontal em ambiente rodoviário, e a terceira explana sobre a relação da velocidade praticada com a segurança viária.

2.1. Simuladores de direção em transportes

Simuladores de direção têm sido utilizados em diversos tipos de estudos como em análise de comportamento de condutores (Zoller *et al.*, 2017), de treinamento de condutores (Wu *et al.*, 2018), de interação com veículos autônomos (Al-Shihabi e Mourant, 2003), de percepção de sinalização (Larocca *et al.*, 2018), de projeto geométrico (Bella, 2015), de uso de álcool na condução (Vollrath e Fischer, 2017).

O uso de simuladores pode ser uma alternativa adequada em relação às pesquisas em campo, uma vez que essas são onerosas e possuem empecilhos na coleta de dados. Os simuladores são interativos, pois permitem que se façam modificações nas configurações do veículo ou do cenário com o objetivo de registrar os efeitos causados no comportamento do condutor em relação à sua velocidade, trajetória e frenagem (Bella, 2008; Bella, 2014), sendo que a tecnologia associada a eles oferece a possibilidade de rápida troca da condição simulada (Blana, 1996). Sua principal vantagem em pesquisas em transportes é a possibilidade de estudar, em ambiente seguro, diversos fatores viários e ambientais que interferem no comportamento do condutor. Adicionalmente, os simuladores de direção propiciam o aumento do poder estatístico do estudo por ser viável a obtenção de uma amostra grande de condutores, o planejamento de cenários com diferenças mais salientes e o controle de fatores

não relacionados ao estudo, mas que influenciam no comportamento do condutor (Reinhard *et al.*, 2018).

Os simuladores de direção podem ser do tipo imersivo, os quais possuem algumas vantagens em relação aos de projeção em tela plana. Mourant e Schultheis (2001) citam que o condutor apenas precisa de um volante e dos pedais ao utilizar óculos de imersão, logo o espaço físico ocupado pelo equipamento é menor. O condutor possui uma visão de 360 graus e a sensação de estar presente dentro do cenário virtual, o que propicia a execução de situações realísticas.

O uso de simuladores imersivos, contudo, possui uma limitação importante: possibilidade de provocar sintomas de mal-estar (*simulator sickness*) nos usuários. Relata-se, na literatura, alguns fatores são relacionados à suscetibilidade aos sintomas como idade da pessoa (Brooks *et al.*, 2010; Bélanger *et al.*, 2010), exposição a ambientes virtuais no passado (Domeyer *et al.*, 2013; Kennedy *et al.*, 2000), instabilidade postural (Smart *et al.*, 2002) e gênero da pessoa (Classen *et al.*, 2011). Para avaliar a possível sensação de mal-estar nos condutores, Nodari *et al.* (2017) realizaram um estudo em simulador de direção imersivo e concluíram que um período de condução de aproximadamente oito minutos provocou sintomas leves e moderados, sendo vista cansada, cabeça pesada, cansaço, vertigem e náusea os mais frequentes.

2.2. Luminosidade e sinalização horizontal

O risco de conduzir no período noturno é mais elevado para condutores de todas as idades, no entanto o aumento do risco é maior para condutores entre 20 e 44 anos (Williams, 2013). Os acidentes durante esses períodos não se relacionam apenas com a visibilidade, mas também com os usuários da via e seus estilos de condução (Clarke *et al.*, 2006). Embora não se possa atribuir a causa dos acidentes somente à baixa visibilidade, a maior taxa de acidentes fatais (número de acidentes fatais por quilômetro dirigido) ocorre durante a noite, sendo de três a quatro vezes maior que durante o dia (Owens e Sivak, 1996).

Evidências sugerem que acidentes ocorridos durante a noite são resultados de problemas visuais relacionados à baixa luminosidade, o que aumenta o tempo de reação dos motoristas e, conseqüentemente, aumento na distância de parada (Plainis e Murray, 2002). O olho humano não se adapta muito bem às condições de baixa luminosidade. Tanto a acuidade visual quanto a sensibilidade ao contraste diminuem conforme a quantidade de luz diminui (Fors e

Lundkvist, 2009), logo a iluminação rodoviária deve ser projetada para atender à visão humana limitada.

O brilho dos faróis dos veículos também afeta a condução noturna. Theeuwes *et al.* (2002) expuseram participantes a uma fonte de luz durante a condução à noite e descobriram que os motoristas adaptaram a velocidade somente quando a via era sinuosa, estreita e escura. Bella e Calvi (2013) estudaram a condução em diferentes projetos rodoviários durante o dia e a noite em simulador de direção e concluíram que não é satisfatório analisar a velocidade da via baseada apenas na luz do dia, pois as condições críticas identificadas durante a simulação noturna não foram identificadas durante a simulação diurna.

Algumas propriedades das rodovias como a sinalização horizontal (marcas sobre o revestimento) podem servir tanto como instrução para o condutor quanto como um guia para seu comportamento, proporcionando segurança e conforto (Charlton, 2007; DNIT, 2010; Elliott *et al.*, 2003; Weller *et al.*, 2008). A sinalização horizontal deve fornecer, constantemente, informação sobre a posição do centro e do bordo da pista e, como elas são percebidas pela visão periférica, essa informação é recebida sem que o condutor tire os olhos da pista (Zwahlen e Schnell, 1999). Outros tipos de sinalização horizontal têm sido usados para reduzir a velocidade dos veículos em locais de interesse (Denton, 1980; Fildes e Jarvis, 1994; Godley *et al.*, 1999). Uma medida utilizada em vias rurais é a redução progressiva do espaçamento das linhas tracejadas conforme a redução do limite de velocidade para gerar uma sensação de alta velocidade ao condutor (Herrstedt, 2006).

Sinalização rodoviária horizontal e idade são fatores que, conjuntamente, afetam a visibilidade de condução durante a noite. Zwahlen e Schnell (1999) avaliaram a distância de visibilidade para condutores jovens e idosos com diferentes tipos de pavimento e condições de iluminação. Os resultados indicaram que as distâncias eram 55% maiores para motoristas jovens. Acredita-se que a presença das linhas de centro e de bordo possui potencial para reduzir a ocorrência de acidentes em até 20% (Miller, 1992). Por outro lado, Fildes *et al.* (1987) e Willis *et al.* (1984) mostram que as linhas de bordo não têm influência na redução da velocidade praticada por condutores. Em alguns casos, constatou-se que a presença de linhas de bordo resultou em um aumento da velocidade (Ranney e Gawron, 1986).

Musick (1962, *apud* Hauer, 2018) e Basile (1962, *apud* Hauer, 2018) analisaram o efeito das primeiras implantações das linhas de bordo em rodovias nos Estados Unidos quanto ao número de acidentes. Os dois estudos concluíram que os acidentes haviam reduzido nos acessos, embora o motivo tenha sido inconclusivo, pois não há linhas de bordo nesses pontos. Os dois estudos, no entanto, também concluíram que o número de acidentes nos segmentos entre os pontos de acesso havia sido maior que o esperado caso as linhas de bordo não estivessem presentes.

Logo a sinalização rodoviária horizontal pode ser usada para alterar na velocidade dos veículos de duas formas distintas. A primeira atraindo a atenção dos condutores e fornecendo informações sobre diferentes situações do ambiente viário, e a segunda interferindo na percepção dos condutores em relação à sua própria velocidade (Charlton *et al.*, 2018).

2.3. Velocidade praticada e segurança viária

A velocidade praticada por motoristas possui uma função importante no gerenciamento e controle de tráfego. Entende-se que ela é um fator determinante no número e frequência de acidentes (National Research Council, 2010), pois a condução se torna mais complexa em altas velocidades, logo a probabilidade de erro é maior (Pei *et al.*, 2012). Como altas velocidades tendem a estar associadas ao aumento tanto da severidade quanto da frequência de acidentes (Elvik, 2013; Elvik, 2019; Nilsson, 2004), o papel das linhas de centro e de bordo na provisão de ambientes viários seguros torna-se suscetível a questionamentos (Hauer, 2018).

Tanto a velocidade média quanto a variabilidade da velocidade influenciam na ocorrência e severidade de acidentes (Hauer, 2009; National Research Council, 2010). A variabilidade da velocidade pode ainda diminuir a eficiência da rede viária (Garber e Ehrhart, 2000; van Nes *et al.*, 2010). Velocidades harmonizadas em rodovias não só favorecem o fluxo de tráfego como também a segurança viária, a qual é aprimorada pela redução das variações de velocidade na mesma faixa ou entre faixas (Lee *et al.*, 2004; Islam *et al.*, 2013).

3. MÉTODO

Esta seção evidencia as diretrizes do estudo realizado. Será apresentado o simulador de direção imersivo utilizado, o cenário elaborado, o projeto de experimentos desenvolvido, os

dados coletados, a análise de dados realizada e os procedimentos adotados na realização do experimento.

3.1. Simulador de direção

Utilizou-se um simulador de direção do tipo imersivo para este estudo, no qual a pessoa deve colocar óculos de realidade virtual para que se sinta presente no cenário desenvolvido. A imersão proporciona ao participante a possibilidade de enxergar em qualquer direção do ambiente rodoviário virtual, tornando a condução mais fiel à realidade. Adicionalmente, o participante deve vestir fones de ouvido circo auricular para ajudar a isolá-lo acusticamente do ambiente real. Neste simulador, o *cockpit* é montado sobre uma plataforma dinâmica com dois graus de liberdade capaz de reproduzir as forças que atuam em um veículo em movimento (Figura 1).



Figura 1: Simulador de direção imersivo

Optou-se por configurar câmbio automático para tanto facilitar quanto uniformizar a condução entre os participantes. Os componentes do veículo (volante, pedal do freio, pedal do acelerador, espelhos e painel) são semelhantes àqueles encontrados em veículos de passeio.

3.2. Cenário do estudo

O cenário de estudo foi um trecho rodoviário virtual elaborado na plataforma Unity. O trecho é composto por um segmento com extensão aproximada de 2500 metros de pista dupla em reta destinado à adaptação do condutor ao equipamento. Na sequência do trecho ocorre a transição para o segmento experimental propriamente dito. Nele é apresentado ao condutor um cenário rodoviário de pista simples em relevo ondulado com sucessão de trechos curvos e retilíneos e com aproximadamente 3200 metros de extensão. As larguras da faixa e do acostamento eram de 4 e 3 metros respectivamente, e não havia defensas em nenhuma parte do trecho. Havia tráfego no sentido contrário composto tanto de veículos leves quanto de pesados, no entanto não havia tráfego no sentido em que o participante conduzia, sendo desnecessária manobras como ultrapassagem. Foram desenvolvidas quatro combinações de cenários nessas condições: com linhas e dia, com linhas e noite, sem linhas e dia, sem linhas e noite (Figura 2).

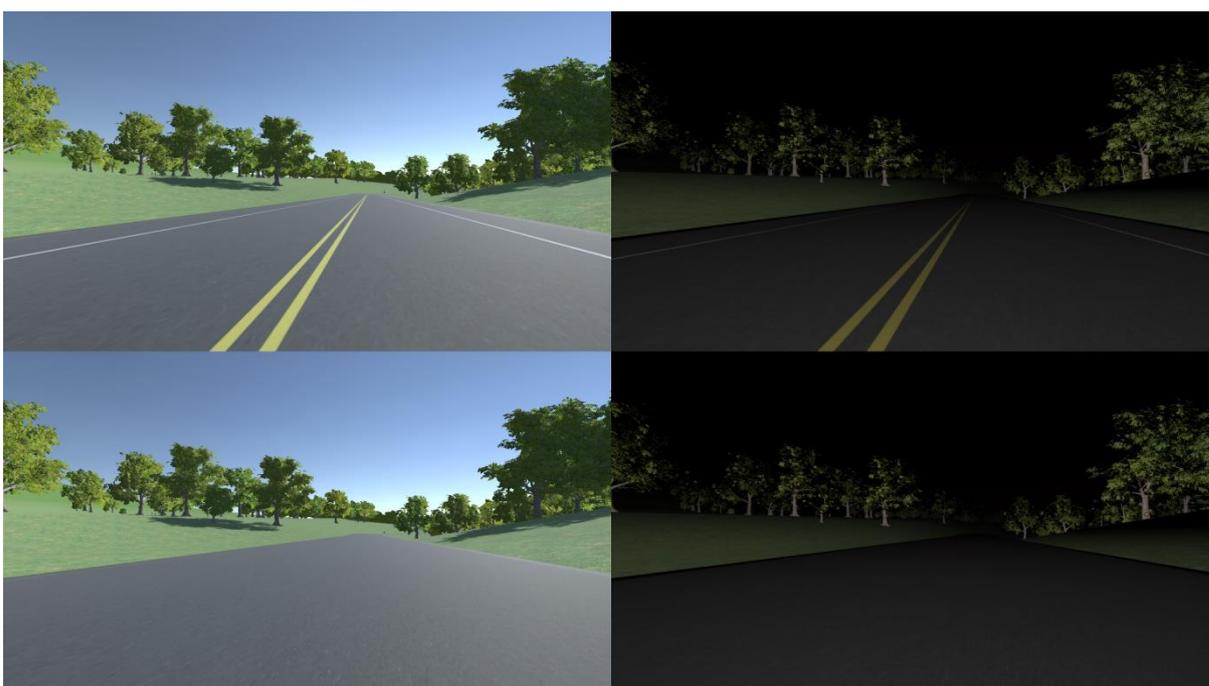


Figura 2: Ilustração dos diferentes cenários

3.3. Projeto de experimentos

O estudo foi desenvolvido conforme um projeto de experimentos fatorial 2^k (quantidade “k” de fatores em dois níveis cada) com repetição e de quatro fatores controláveis: gênero do participante, idade do participante, luminosidade do ambiente e presença das linhas de centro e de bordo na pista. O tamanho da amostra requerido para este estudo foi de 32 pessoas. Os

níveis dos fatores controláveis podem ser visualizados na Tabela 1. A variável resposta do experimento foi a velocidade média praticada pelos condutores no trecho experimental. Fatores como dia e horário de execução do experimento foram considerados como ruído.

Tabela 1: Níveis dos fatores controláveis

Fatores	Níveis	
Gênero	mulher	homem
Idade	19-30 anos	31-60 anos
Luminosidade	noite	dia
Linhas	sem	com

A divisão das faixas etárias foi definida com base nos preços dos seguros automotivos, a fim de mantê-las homogêneas em relação ao estilo de condução. Exigiu-se que cada participante cumprisse três requisitos para participar: (i) possuir Carteira Nacional de Habilitação há pelo menos um ano; (ii) conduzir frequentemente em vias urbanas; e (iii) conduzir ocasionalmente em rodovias.

3.4. Coleta e análise de dados

A velocidade e a dispersão das velocidades praticadas pelos participantes em cada cenário virtual serão utilizadas como métrica de segurança viária, e os resultados deste estudo serão dados em diferenças relativas de segurança viária. Os dados coletados foram as características do condutor autodeclaradas: gênero e idade, e desempenho de condução: velocidade em quilômetros por hora coletada a cada estaca de 20 metros do trecho experimental.

Como a variável resposta definida foi a velocidade média praticada pelos participantes no trecho experimental, a análise estatística dos dados consistiu em verificar a existência de diferença significativa entre cada tratamento (nível), isto é, se os participantes conduziram mais rápido em um cenário do que em outro. Para isso foi utilizada a análise de variância (ANOVA) do *software* Minitab – verificando tanto os efeitos de primeira quanto de segunda e de terceira ordem dos fatores controláveis com a variável resposta – e coeficiente de variação. Dado que a ANOVA pressupõe que as variâncias dos grupos são iguais estatisticamente, verificou-se a existência de homogeneidade de variâncias por meio do teste de Levene do *software* SPSS. Foi verificado, também, a normalidade dos resíduos por meio dos testes de Kolmogorov-Smirnov e Shapiro-Wilk.

3.5. Procedimentos adotados na realização do experimento

Inicialmente, cada participante preenchia um questionário onde informava seu gênero e sua idade e assinava um termo de consentimento relativo à sua participação no experimento. Em seguida, ele era conduzido até o equipamento e posicionado no simulador enquanto recebia as instruções básicas sobre seu uso. A partir desse momento, o participante iniciava a condução pelo segmento destinado à sua adaptação ao simulador sem ter sua velocidade coletada até o momento de transição para o segmento experimental. Ao ingressar no segmento experimental do cenário, o período de avaliação iniciava efetivamente e a velocidade praticada era registrada a cada 20 metros. Os participantes possuíam liberdade para desistir do experimento a qualquer momento caso desejassem, e seus dados seriam excluídos da análise.

4. RESULTADOS

A amostra pesquisada consistiu de 32 participantes voluntários, o que corresponde a um erro relativo de 4,6% na medição da velocidade média, considerando um intervalo de confiança de 95%. Todos participantes percorreram um trecho experimental de 3200 metros, o que resultou em um tempo total de condução de aproximadamente três minutos – período de exposição em ambiente imersivo associado à baixa ou nenhuma intensidade de sintomas de mal-estar conforme Nodari *et al.* (2017).

A Tabela 2 apresenta os resultados para o teste de Levene, o qual verifica a existência de homogeneidade de variâncias entre grupos. O resultado de 0,210 para o teste indica que a hipótese nula de que as variâncias são iguais não pode ser rejeitada.

Tabela 2: Teste de homogeneidade de variância

F	gl1	gl2	sig.
1,512	15	16	0,210

A Tabela 3 mostra os resultados para os testes de normalidade dos resíduos Kolmogorov-Smirnov e Shapiro-Wilk. Os resultados de 0,201 e 0,901 para os testes indicam que a hipótese nula de que os resíduos seguem uma distribuição normal não pode ser rejeitada.

Tabela 3: Testes de normalidade dos resíduos

	Kolmogorov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
	Estatística	gl	sig.	Estatística	gl	sig.
Residual para Velocidade	0,099	32	0,201	0,984	32	0,901

Como os dados não precisam sofrer transformação, prossegue-se para o teste F da ANOVA cujo resultado se encontra na Tabela 4. De todas variáveis independentes, somente o gênero do participante demonstrou ter relação significativa com a variável resposta (velocidade média) no estudo realizado. Nenhuma interação de segunda ordem indicou ter relação significativa com a variável resposta, mas a interação de terceira ordem das variáveis independentes gênero do participante, idade do participante e luminosidade do ambiente possuiu influência sobre a velocidade praticada.

Tabela 4: Resumo da análise de variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Gênero	1	1394,54	1394,54	9,22	0,007
Idade	1	69,77	69,77	0,46	0,506
Luminosidade	1	118,53	118,53	0,78	0,388
Linhas	1	320,29	320,29	2,12	0,164
Gênero*Idade	1	249,6	249,6	1,65	0,216
Gênero*Luminosidade	1	99,63	99,63	0,66	0,428
Gênero*Linhas	1	368,14	368,14	2,43	0,137
Idade*Luminosidade	1	2,65	2,65	0,02	0,896
Idade*Linhas	1	21,75	21,75	0,14	0,709
Luminosidade*Linhas	1	22,32	22,32	0,15	0,706
Gênero*Idade*Luminosidade	1	782,15	782,15	5,17	0,036
Gênero*Idade*Linhas	1	172,18	172,18	1,14	0,301
Gênero*Luminosidade*Linhas	1	232,4	232,4	1,54	0,232
Idade*Luminosidade*Linhas	1	43,66	43,66	0,29	0,598

A variável independente gênero do participante indicou possuir uma influência significativa com a velocidade média praticada. Um gráfico *boxplot* da velocidade em função do gênero pode ser visualizado na Figura 3. É possível observar que a velocidade mínima dos dois gêneros foi de aproximadamente 70 km/h, no entanto a variabilidade das velocidades praticadas pelas mulheres foi menor. Adicionalmente, metade dos homens conduziu mais rápido que praticamente a maior velocidade registrada pelas mulheres no trecho estudado.

Pressupõe-se que fatores comportamentais relacionados aos gêneros, como agressividade, possam explicar as diferenças encontradas no estilo de condução.

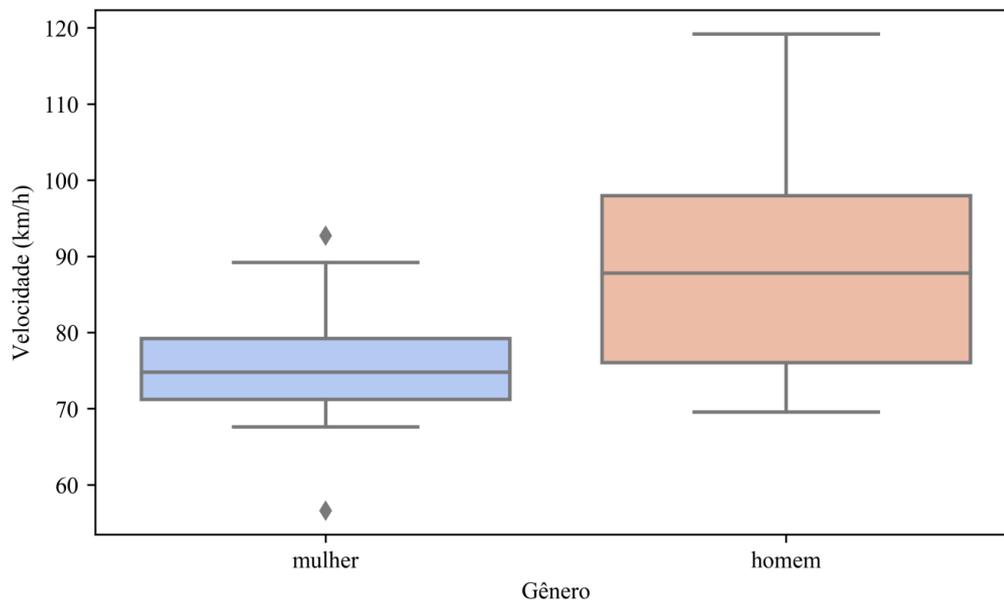


Figura 3: *Boxplot* da velocidade em função do gênero

A variável independente idade do participante não demonstrou possuir influência de primeira ordem sobre a variável resposta, o que sugere existir uma homogeneidade da velocidade condução para pessoas de até 60 anos. As variáveis independentes luminosidade do ambiente e presença das linhas de centro e de bordo também não demonstraram possuir influência de primeira ordem sobre a variável resposta.

A interação de terceira ordem entre gênero, idade e luminosidade indicou possuir influência significativa sobre a velocidade praticada. A visualização dessa interação está apresentada na Figura 4. Observa-se que mulheres praticaram velocidade superior quanto mais jovem elas eram independentemente da luminosidade do ambiente. Por outro lado, homens conduziram mais rápido quanto mais velho eles eram e quanto menor era a luminosidade do ambiente. Ao considerar a velocidade praticada como métrica de segurança viária, as combinações descritas acima seriam as mais perigosas para cada grupo neste estudo.

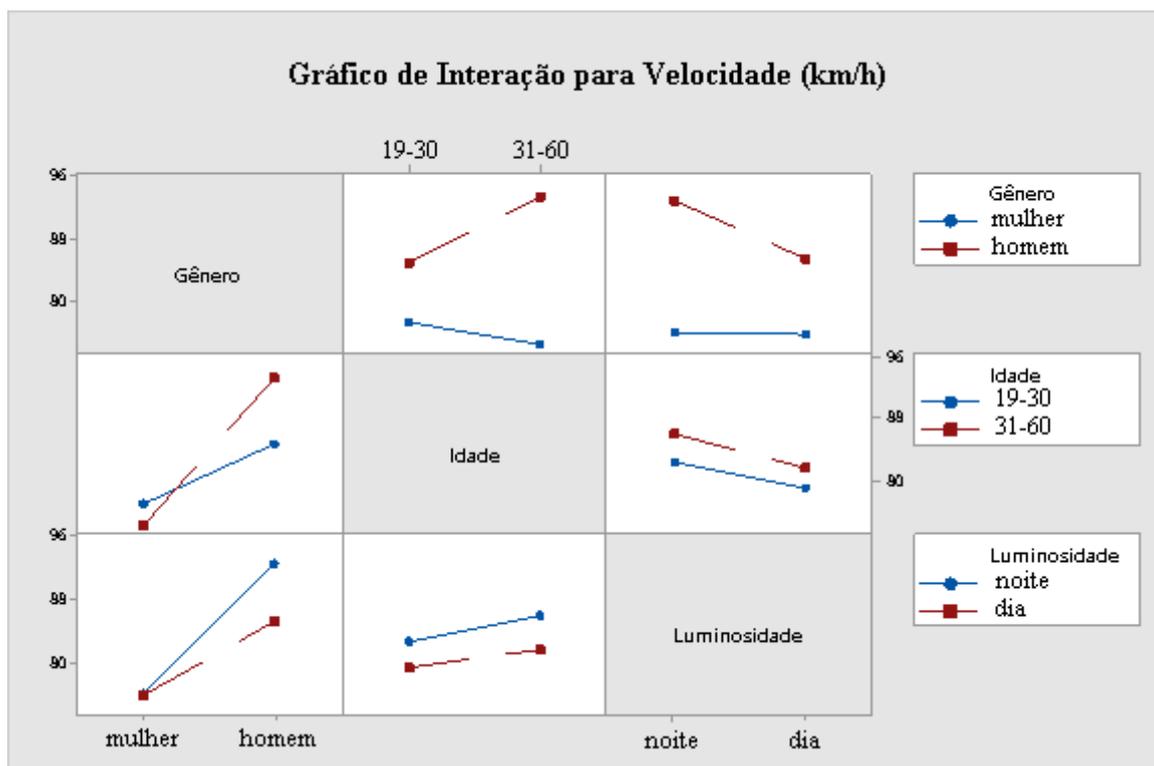


Figura 4: Interação dos fatores controláveis com a variável resposta

Dentre as possíveis limitações do estudo tem-se a não utilização de participantes com idade superior a 60 anos devido à disponibilidade reduzida. Essa faixa etária pode possuir estilo de condução diferente dos mais jovens devido a diferentes percepções de risco, a diferentes experiências automobilísticas ou a limitações motoras. Quanto à luminosidade do ambiente pode existir uma limitação do simulador em prover um cenário noturno suficientemente realista para reproduzir o comportamento do condutor fiel à realidade. O tempo total de condução, o qual era limitado para preservar a saúde dos participantes, também pode não ter sido longo o bastante.

Uma análise de dispersão da velocidade foi realizada por meio do coeficiente de variação de cada cenário. O resultado dessa análise pode ser visualizado na Tabela 5 e na Figura 5.

Tabela 5: Coeficiente de variação de cada cenário para a velocidade

Velocidade	dia com linhas (1)	dia sem linhas (2)	noite com linhas (3)	noite sem linhas (4)
desvio-padrão (km/h)	11,66	7,38	22,87	12,03
média (km/h)	84,55	76,55	86,73	82,07
CV (%)	13,79	9,64	26,37	14,66

Ao comparar os pares de cenários tanto durante o dia (1) e (2) quanto durante a noite (3) e (4), é possível perceber que a dispersão das velocidades é maior quando as linhas estão presentes. Ao fixar as situações com linhas (1) e (3) e sem linhas (2) e (4), nota-se que o coeficiente de variação é maior para o período noturno.

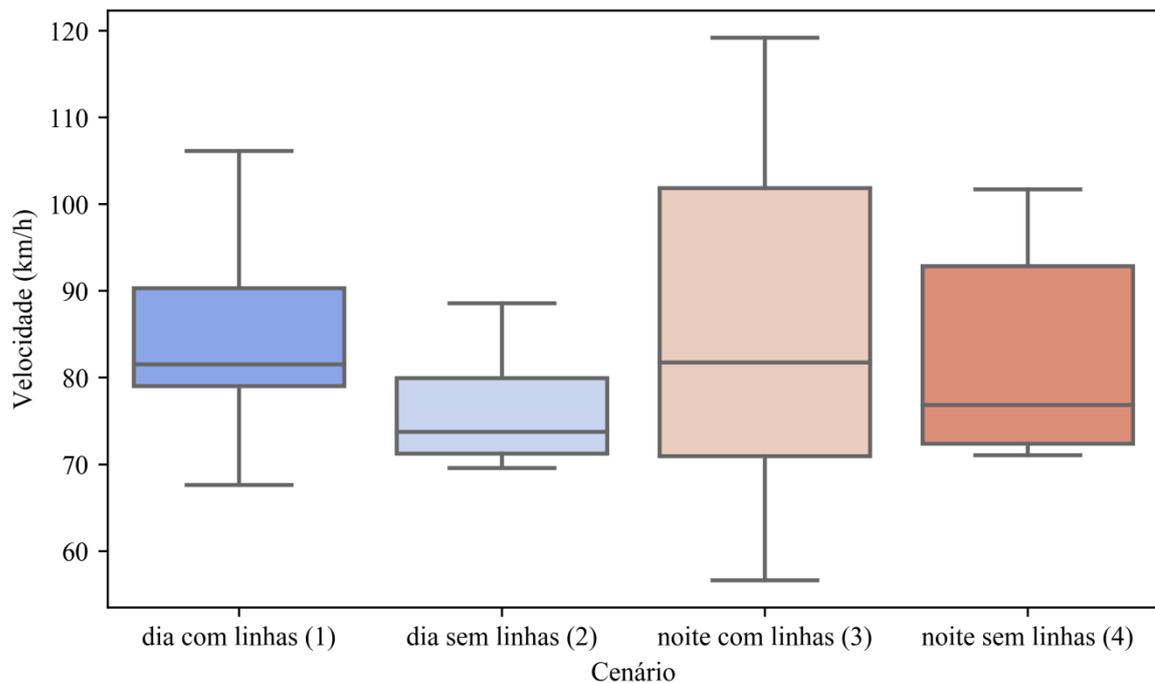


Figura 5: *Boxplot* da velocidade em função do cenário

Embora as variáveis independentes luminosidade do ambiente e presença das linhas de centro e de bordo não terem indicado possuir influência de primeira ordem com a velocidade praticada, o resultado da avaliação da dispersão da velocidade mostrou que a condução durante o período noturno pode ser mais perigosa conforme encontrado na literatura revisada. A análise do coeficiente de variação também sugere que, quando as linhas de centro e de bordo estão presentes, ocorre maior variabilidade de velocidade, e isso pode provocar mais acidentes na via. A possibilidade de perigo maior quando as linhas estão presentes está alinhada com a discussão realizada por Hauer (2018).

A métrica utilizada para avaliar a segurança viária neste estudo foi influenciada na análise de variância (ANOVA) por apenas uma variável, ou por três variáveis quando em conjunto. Hipóteses como limitação do simulador e pouco tempo de experimento podem ser justificativas para resultados não conclusivos estatisticamente. Ressalta-se, contudo, a

importante discussão feita por Hauer (2018), na qual medidas de segurança viária não devem ser realizadas baseadas apenas em opinião, mas em evidência. O emprego de simuladores de direção tem oferecido novas oportunidades de investigação em segurança viária com evidência técnica, apesar de ainda existir limitações em ambiente simulado.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve por objetivo estimar o efeito que a luminosidades do ambiente e a presença das linhas de centro e de bordo de uma rodovia provocam sobre a velocidade praticada por condutores: parâmetro que foi utilizado como métrica para analisar a segurança viária. Para isso foram desenvolvidas, para um simulador de direção imersivo, quatro versões de um cenário rodoviário virtual: (i) com linhas de centro e de bordo em luminosidade compatível com dia; (ii) com linhas de centro e de bordo em luminosidade compatível com noite; (iii) sem linhas de centro e de bordo em luminosidade compatível com dia; e (iv) sem linhas de centro e de bordo em luminosidade compatível com noite. Cada versão possuía dois segmentos rodoviários, sendo o primeiro dedicado à adaptação do condutor ao simulador de direção imersivo. O primeiro segmento foi projetado em pista dupla com aproximadamente 2500 metros. Já o segundo segmento, denominado segmento experimental, foi desenhado em pista simples com aproximadamente 3200 metros.

De forma a atender ao objetivo deste artigo, uma amostra de 32 participantes, definida de acordo com um projeto de experimentos de quatro fatores controláveis (gênero do participante, idade do participante, luminosidade do ambiente e presença das linhas de centro e de bordo na pista), foi submetida à condução nos cenários desenvolvidos. Cada participante conduziu apenas em uma das versões por um tempo aproximado de três minutos para evitar possíveis efeitos de mal-estar associados à condução em simuladores (*simulator sickness*). Os registros das velocidades praticadas por cada condutor no segmento experimental foram organizados e utilizados na análise de variância e de dispersão para verificar diferenças de velocidade praticada entre a condução em cada cenário. Entre os resultados, destacam-se:

- O gênero da pessoa possuiu influência sobre a velocidade praticada, onde homens conduziram em média 17,3% mais rápido que mulheres;
- Para mulheres, quanto menor a idade e independentemente da luminosidade, maior foi a velocidade praticada;
- Para homens, quanto maior a idade e quanto menor a luminosidade, maior foi a

velocidade praticada;

- Cenários noturnos possuíram maior dispersão de velocidade que os diurnos;
- Cenários com linhas possuíram maior dispersão de velocidade que os sem linhas.

Dado que os homens conduziram mais rápido que as mulheres neste experimento, sugere-se que o sexo masculino pode estar mais propenso a se envolver em acidentes assim como relatado na literatura. Possíveis explicações podem estar associadas a fatores comportamentais ou a diferentes percepções de risco de cada gênero. Algumas variáveis independentes não demonstraram possuir influência estatisticamente significativa sobre a variável resposta, embora na literatura sejam relatadas tais influências. Possíveis causas incluem nível de realismo da condução não suficiente devido a limitações do *software* utilizado para desenvolvimento dos cenários e pouco tempo de experimento, o qual foi limitado para não comprometer a saúde dos participantes.

Agradecimentos

Os autores agradecem às empresas MO3 e BS Motion pelo apoio na realização do experimento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Al-Shihabi, T. e R. R. Mourant (2003) Toward More Realistic Driving Behavior Models for Autonomous Vehicles in Driving Simulators. *Transportation Research Record*, v. 1843, p. 41-49.
- Bélanger, A.; S. Gagnon e S. Yamin (2010) Capturing the Serial Nature of Older Drivers' Responses Towards Challenging Events: A Simulator Study. *Accident Analysis and Prevention*, v. 42, p. 809-817.
- Bella, F. (2008) Driving Simulator for Speed Research on Two-Lane Rural Roads. *Accident Analysis and Prevention*, v. 40, p. 1078-1087.
- Bella, F. e A. Calvi (2013) Effects of Simulated Day and Night Driving on the Speed Differential in Tangent-Curve Transition: A Pilot Study Using Driving Simulator. *Traffic Injury Prevention*, v. 14(4), p. 413-423.
- Bella, F. (2014) Driver Perception Hypothesis: Driving Simulator Study. *Transportation Research Part F*, v. 24, p. 183-196.
- Bella, F. (2015) Coordination of Horizontal and Sag Vertical Curves on Two-Lane Rural Roads: Driving Simulator Study. *International Association of Traffic and Safety*

Sciences (LATSS), v. 39, p. 51-57.

- Blana, E. (1996) Driving Simulator Validation Studies: A Literature Review. Working Paper 480. Institute of Transport Studies, University of Leeds, UK.
- Brooks, J. O.; R. R. Goodenough; M. C. Crisler; N. D. Klein; R. L. Alley; B. L. Koon; W. C. Logan Jr.; J. H. Ogle; R. A. Tyrrell e R. F. Wills (2010) Simulator Sickness During Driving Simulation Studies. *Accident Analysis and Prevention*, v. 42, p. 788-796.
- Charlton, S. G. (2007) Delineation Effects in Overtaking Lane Design. *Transportation Research Part F*, v. 10, p. 153-163.
- Charlton, S. G.; N. J. Starkey e N. Malhotra (2018) Using Road Markings as a Continuous Cue for Speed Choice. *Accident Analysis and Prevention*, v. 117, p. 288-297.
- Clarke, D. D.; P. Ward; C. Bartle e W. Truman (2006) Young Driver Accidents in the UK: The Influence of Age, Experience, and Time of Day. *Accident Analysis and Prevention*, v. 38, p. 871-878.
- Classen, S.; M. Bewernitz e O. Shechtman (2011) Driving Simulator Sickness: An Evidence-Based Review of the Literature. *American Journal of Occupational Therapy*, v. 65, p. 179-188.
- Denton, G. G. (1980) The Influence of Visual Pattern on Perceived Speed. *Perception*, v. 9, p. 393-402.
- DNIT (2010) Manual de Sinalização Rodoviária. Ministério dos Transportes, Rio de Janeiro.
- Domeyer, J. E.; N. D. Cassavaugh e R. W. Backs (2013) The Use of Adaptation to Reduce Simulator Sickness in Driving Assessment and Research. *Accident Analysis and Prevention*, v. 53, p. 127-132.
- Elliott, M. A.; V. A. McColl e J. V. Kennedy (2003) Road Design Measures to Reduce Drivers' Speed via Psychological Processes: A Literature Review. TRL Report TRL564.
- Elvik, R. (2013) A Re-Parameterisation of the Power Model of the Relationship Between the Speed of Traffic and the Number of Accidents and Accident Victims. *Accident Analysis and Prevention*, v. 50, p. 854-860.
- Elvik, R.; A. Vadeby; T. Hels e I. van Schagen (2019) Updated Estimates of the Relationship Between Speed and Road Safety at the Aggregate and Individual Levels. *Accident Analysis and Prevention*, v. 123, p. 114-122.
- Fildes, B. N.; M. R. Fletcher e J. McM. Corrigan (1987) Speed Perception 1: Drivers' Judgements of Safety and Speed on Urban and Rural Straight Roads. Report CR 54. Federal Office of Road Safety. Canberra, Australia.

- Fildes B. N. e J. R. Jarvis (1994) Perceptual Countermeasures: Literature Review. Report CR4/94. Monash University Accident Research Centre. Clayton, Victoria.
- Fors, C. e S. Lundkvist (2009) Night-time Traffic in Urban Area: A Literature Review on Road Users Aspects. The Swedish Road Administration. VTI Rapport 650A.
- Garber, N. J. e A. A. Ehrhart (2000) Effect of Speed, Flow, and Geometric Characteristics on Crash Frequency for Two-Lane Highways. *Transportation Research Record*, v. 1717, p. 76-83.
- Godley, S.; B. Fildes; T. Triggs e L. Brown (1999) Perceptual Countermeasures: Experimental Research. Report CR 182. Monash University Accident Research Centre. Clayton, Victoria.
- Hauer, E. (2009) Speed and Safety. *Transportation Research Record*, v. 2103, p. 10-17.
- Hauer, E. (2018) Road Safety Research and Practice: Problems of Coexistence. Disponível em:
<https://www.researchgate.net/profile/Ezra_Hauer/publication/322775312_Road_safety_research_and_practice_problems_of_coexistence/links/5a6f85e1458515015e61643b/Road-safety-research-and-practice-problems-of-coexistence.pdf>. Acesso em: 05 jul. 2018.
- Herrstedt, L. (2006) Self-Explaining and Forgiving Roads – Speed Management in Rural Areas. *Proceedings of Research into Practice*. Canberra, Australia.
- Islam, M. T.; M. Hadiuzzaman; J. Fang; T. Z. Qiu e K. El-Basyouny (2013) Assessing Mobility and Safety Impacts of a Variable Speed Limit Control Strategy. *Transportation Research Record*, v. 2364, p. 1-11.
- Kennedy, R. S.; K. M. Stanney e W. P. Dunlap (2000) Duration and Exposure to Virtual Environments: Sickness Curves During and Across Sessions. *Presence*, v. 9, p. 463-472.
- Larocca, A. P. C.; R. L. Ribeiro; A. C. Figueira; P. T. M. S. de Oliveira; L. C. Lulio e M. A. C. Rangel (2018) Analysis of Perception of Vertical Signaling of Highways by Drivers in a Simulated Driving Environment. *Transportation Research Part F*, v. 58, p. 471-487.
- Lee, C.; B. Hellinga e F. Saccomanoo (2004) Assessing Safety Benefits of Variable Speed Limits. *Transportation Research Record*, v. 1897, p. 183-190.
- Miller, T. R. (1992) Benefit-Cost Analysis of Lane Marking. *Transportation Research Record*, v. 1334, p. 38-45.
- Mourant, R. R. e M. T. Schultheis (2001) A HMD Based Virtual Reality Driving Simulator.

Proceedings of the First International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design. Aspen, USA.

- National Research Council (2010) Highway Safety Manual. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC.
- Nilsson, G. (2004) Traffic Safety Dimensions and the Power Model to Describe the Effect of Speed on Safety. Doctoral Thesis. Department of Technology and Society, Lund Institute of Technology, Sweden.
- Nodari, C. T.; M. C. de Oliveira; M. R. Veronez; F. Bordin; L. Gonzaga Jr.; A. P. C. Larocca e C. Framarim (2017) Avaliação do Realismo e da Sensação de Mal-Estar (Simulator Sickness) no Uso de Simulador Imersivo de Direção. *Anais do XXXI Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, ANPET, Recife, v. 1, p. 3103-3115.
- Owens, D. A. e M. Sivak (1996) Differentiation of Visibility and Alcohol as Contributors to Twilight Road Fatalities. *Human Factors*, v. 38(4), p. 680-689.
- Pei, X.; S. C. Wong e N. N. Sze (2012) The Roles of Exposure and Speed in Road Safety Analysis. *Accident Analysis and Prevention*, v. 48, p. 464-471.
- Plainis, S. e I. J. Murray (2002) Reaction Times as an Index of Visual Conspicuity when Driving at Night. *Ophthal. Physiol.*, v.22, p. 409-415.
- Ranney, T. A. e V. J. Gawron (1986) The Effects of Pavement Edgelines on Performance in a Driving Simulator Under Sober and Alcohol-Dosed Conditions. *Human Factors*, v. 28(5), p. 511-525.
- Reinhard, R. T.; M. Kleer e K. Drebler (2018) The Impact of Individual Simulator Experiences on Usability and Driving Behavior in a Moving Base Driving Simulator. *Transportation Research Part F*, in press.
- Smart, L. J.; T. A. Stoffregen e B. G. Bardy (2002) Visually Induced Motion Sickness Predicted by Postural Instability. *Human Factors*, v. 44, p. 451-465.
- Summala, H. (1996) Accident Risk and Driver Behaviour. *Safety Science*, v. 22(1-3), p. 103-117.
- Theeuwes, J.; J. W. A. M. Alferdinck e M. Perel (2002) Relation Between Glare and Driving Performance. *Human Factors*, v.44, p. 95-107.
- van Nes, N.; S. Brandenburg e D. Twisk (2010) Improving Homogeneity by Dynamic Speed Limit Systems. *Accident Analysis and Prevention*, v. 42, p. 944-952.
- Vollrath, M. e J. Fischer (2017) When Does Alcohol Hurt? A Driving Simulator Study. *Accident Analysis and Prevention*, v. 109. p. 89-98.
- Weller, G.; B. Schlag; T. Friedel e C. Rammin (2008) Behaviourally Relevant Road

- Categorisation: A Step Towards Self-Explaining Rural Roads. *Accident Analysis and Prevention*, v. 40, p. 1581-1588.
- WHO (2018) Global Status Report on Road Safety 2018. World Health Organization, Geneva.
- Williams, A. F. (2013) Teenage Drivers: Patterns of Risk. *Journal of Safety Research*, v. 34, p. 5-15.
- Willis, P. A.; P. P. Scott e J. W. Barnes (1984) Road Edgelining and Accidents: An Experiment in South-West England. TRRL Laboratory Report 1117. Transport and Road Research Laboratory. Crowthorne, Berkshire.
- Wu, Y.; X. Zhao; J. Rong e Y. Zhang (2018) The Effectiveness of Eco-Driving Training for Male Professional and Non-Professional Drivers. *Transportation Research Part D*, v. 59, p. 121-133.
- Zoller, I.; B. Abendroth e R. Bruder (2017) Driver Behaviour Validity in Driving Simulators – Analysis of the Moment of Initiation of Braking at Urban Intersections. *Transportation Research Part F*, in press.
- Zwahlen, H. T. e T. Schnell (1999) Visibility of Road Markings as a Function of Age, Retroreflectivity Under Low-Beam and High-Beam Illumination at Night. *Transportation Research Record*, v. 1692, p. 152-163.

CAPÍTULO 4 – ARTIGO 3

ANÁLISE DA POSIÇÃO LATERAL SOB UMA PERSPECTIVA DE SEGURANÇA VIÁRIA

Maurício Castilhos de Oliveira

Christine Tessele Nodari

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Escola de Engenharia de Produção

RESUMO

Este artigo tem como objetivo avaliar o efeito que a luminosidade do ambiente e a presença das linhas de centro e de bordo provocam sobre a posição lateral. Para isso foi utilizado um simulador de direção imersivo. O estudo realizado envolveu 32 condutores voluntários de diferentes idades e gêneros determinados a partir de um projeto de experimentos fatorial 2^k . A análise de variância (ANOVA) indicou que houve interações significativas de primeira e de segunda ordem sobre a variável resposta. Condutores com mais idade conduziram mais afastado do fluxo oposto e desenvolveram maior variabilidade na posição lateral comparado aos mais jovens. Situações semelhantes ocorreram nos cenários diurnos e nos cenários sem a presença das linhas. Os resultados puderam ser explicados por teorias de percepção de risco e modelos comportamentais.

ABSTRACT

This article aims to evaluate the effect that the ambient light and the presence of the centerline and edge lines cause on the lateral position. For this, an immersive driving simulator was used. The study involved 32 volunteer drivers of different ages and gender determined from a 2^k factorial experiment design. An analysis of variance (ANOVA) indicated that there were significant first and second order interactions on the response variable. Older drivers drove further away from the opposite traffic and developed greater lateral position variability compared to younger ones. Similar situations occurred in daytime scenarios and in scenarios without the presence of the lines. The results could be explained by theories of risk perception and behavioral models.

1. INTRODUÇÃO

Simuladores de direção têm sido usados tanto para treinamento de condutores quanto em pesquisas relacionadas a transportes devido às suas características e aos avanços tecnológicos. A versatilidade na elaboração do estudo, o controle de variáveis de interesse por parte do pesquisador e a relação custo-benefício desejável tornam esse equipamento adequado para pesquisas científicas, pois não envolvem risco real de acidentes. Avanços tecnológicos permitem o desenvolvimento de cenários virtuais semelhantes à realidade, o que proporciona a reprodução do comportamento do condutor e a possibilidade de investigação da segurança viária. Os avanços tecnológicos têm permitido a realização de experimentos em ambiente imersivo, que é factível ao colocar óculos de realidade virtual durante a condução. A imersão oferece aos condutores a sensação de estar presente no cenário virtual, a possibilidade de enxergar em qualquer direção e um comportamento semelhante ao que eles teriam na vida real.

Os simuladores de direção viabilizam estudos difíceis de serem realizados em campo devido a fatores relacionados ao tamanho e à qualidade da amostra e à coleta de dados em situações específicas como de determinado nível de luminosidade do ambiente, de condição climática, de sinalização rodoviária e de parâmetros geométricos. Simuladores oferecem baixo custo de implantação, possibilidade de testar diferentes situações de condução sem colocar o participante em risco real de acidente, de repetir o experimento e de controlar as variáveis do ambiente virtual desenvolvido. Entretanto, o uso de simuladores de direção imersivos pode provocar sintomas de mal-estar nos participantes – relatado na literatura como *simulator sickness*.

A oportunidade de estudo de condições viárias com níveis distintos de luminosidade do ambiente e de sinalização rodoviária em ambiente simulado viabiliza a investigação de informações encontradas na literatura. Relata-se que dirigir durante a noite pode ser mais arriscado que durante o dia para todos os condutores, mas especialmente para os jovens devido às suas percepções de risco diferenciadas (Williams, 2013). A falta de luminosidade resulta em maior tempo de reação e, conseqüentemente, maior tempo de parada do veículo (Plainis e Murray, 2002). Relata-se também que, embora a sinalização rodoviária horizontal – como linhas de centro e de bordo – sirva para disciplinar o uso da via e para guiar seus usuários, ela pode interferir no comportamento dos condutores. Portanto, parâmetros de projeto geométrico, sinalização rodoviária e medidas de segurança viária possuem influência

sobre o comportamento do condutor na via, os quais podem ser diferentes do esperado. Presença das linhas de centro e de bordo, de acostamento e sua largura e de defensas podem alterar a percepção de risco dos usuários da via, provocando alterações na velocidade praticada ou no posicionamento lateral do veículo. As diferentes configurações de parâmetros e de medidas implementadas no ambiente viário implicam em diferentes esforços de condução por parte dos motoristas: situações que impactam diretamente na segurança viária.

Neste artigo é apresentado um estudo realizado em ambiente virtual imersivo, no qual foi avaliada a posição lateral praticada pelos condutores em cenários rodoviários com diferentes níveis de luminosidade e com e sem presença das linhas de centro e de bordo. O estudo possui como objetivo estimar o efeito que a luminosidade do ambiente e a presença das linhas de centro e de bordo de uma rodovia provocam sobre a posição lateral e relacionar esse efeito com o gênero e a idade dos condutores. Este artigo está organizado em cinco seções incluindo esta. Na seção 2, encontra-se o referencial teórico sobre o tema estudado. A seção 3 apresenta o método, onde se encontram informações sobre o equipamento, sobre o cenário, sobre o projeto de experimentos e sobre as ferramentas utilizadas para a análise dos dados. Na seção 4 está a discussão acerca dos resultados obtidos. Por fim, a seção 5 apresenta as considerações finais do estudo realizado.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Esta seção se destina a relatar o embasamento teórico a respeito do tema deste artigo e está dividida em três subseções. A primeira aborda a utilização de simuladores de direção em estudos em transportes, a segunda trata da condução em diferentes níveis de luminosidade e da função da sinalização horizontal em ambiente rodoviário, e a terceira explica sobre posicionamento lateral e segurança viária.

2.1. Simuladores de direção em transportes

Simuladores de direção têm sido utilizados em diversos tipos de estudos como em análise de comportamento de condutores (Zoller *et al.*, 2017), de treinamento de condutores (Wu *et al.*, 2018), de interação com veículos autônomos (Al-Shihabi e Mourant, 2003), de percepção de sinalização (Larocca *et al.*, 2018), de projeto geométrico (Bella, 2015), de uso de álcool na condução (Vollrath e Fischer, 2017).

O uso de simuladores pode ser uma alternativa viável em relação às pesquisas em campo, uma vez que elas podem ser onerosas e possuir empecilhos na coleta de dados. Os simuladores são interativos e permitem fazer modificações nas configurações do veículo ou do cenário com o objetivo de registrar os efeitos causados no comportamento do condutor em relação à sua velocidade, trajetória e frenagem (Bella, 2008; Bella, 2014). Sua principal vantagem em pesquisas em transportes é a possibilidade de estudar, em ambiente seguro, diversos fatores viário-ambientais que alteram o comportamento do condutor (Blana, 1996). Esse equipamento também favorece o aumento do poder estatístico do estudo por ser viável a utilização de uma amostra grande de condutores, o planejamento de cenários com diferenças mais salientes e o controle de fatores não relacionados ao estudo, mas que alteram o comportamento do condutor (Reinhard *et al.*, 2018).

Os simuladores de direção podem ser do tipo imersivo, os quais possuem algumas vantagens em relação aos de projeção em tela plana. Mourant e Schultheis (2001) citam que o condutor apenas precisa de um volante e dos pedais ao utilizar óculos de imersão, logo o espaço físico ocupado pelo equipamento é menor. Adicionalmente, o condutor possui uma visão de 360 graus e a sensação de estar presente dentro do cenário virtual, o que favorece a execução de situações realísticas.

O uso de simuladores imersivos, no entanto, possui uma limitação importante: possibilidade de provocar sintomas de mal-estar (*simulator sickness*) nos usuários. Na literatura, alguns fatores são relacionados à suscetibilidade aos sintomas como idade da pessoa (Brooks *et al.*, 2010; Bélanger *et al.*, 2010), exposição a ambientes virtuais no passado (Domeyer *et al.*, 2013; Kennedy *et al.*, 2000), instabilidade postural (Smart *et al.*, 2002) e gênero da pessoa (Classen *et al.*, 2011). Para avaliar a possível sensação de mal-estar nos condutores, Nodari *et al.* (2017) realizaram um estudo em simulador de direção imersivo e concluíram que um período de condução de aproximadamente 8 minutos provocou sintomas leves e moderados, sendo vista cansada, cabeça pesada, cansaço, vertigem e náusea os mais frequentes.

2.2. Luminosidade do ambiente e sinalização horizontal

O risco de conduzir no período noturno é mais elevado para condutores de todas as idades, no entanto o aumento do risco é maior para condutores entre 20 e 44 anos (Williams, 2013). Os acidentes durante a noite não se relacionam apenas com a visibilidade, mas também com os usuários da via, isto é, com seus motivos e seus estilos de condução (Clarke *et al.*, 2006).

Embora não se possa atribuir a causa dos acidentes somente à baixa visibilidade, a maior taxa de acidentes fatais (número de acidentes fatais por quilômetro dirigido) ocorre durante a noite, sendo de três a quatro vezes maior que durante o dia (Owens e Sivak, 1996).

Evidências sugerem que acidentes ocorridos durante a noite são resultados de problemas visuais relacionados à baixa luminosidade, o que gera um aumento no tempo de reação dos motoristas e, conseqüentemente, aumento na distância de parada (Plainis e Murray, 2002). O olho humano não se adapta muito bem às condições de baixa luminosidade e tanto a acuidade visual quanto a sensibilidade ao contraste diminuem conforme a quantidade de luz diminui (Fors e Lundkvist, 2009), logo a iluminação rodoviária deve ser projetada para atender à visão humana limitada.

Algumas propriedades das rodovias como a sinalização horizontal (marcas sobre o revestimento) podem servir tanto como instrução para o condutor quanto como um guia para seu comportamento, propiciando segurança e conforto (Charlton, 2007; DNIT, 2010; Elliott *et al.*, 2003; Weller *et al.*, 2008). A sinalização horizontal deve fornecer, constantemente, informação sobre a posição do centro e do bordo da pista e, como elas são percebidas pela visão periférica, essa informação é recebida sem que o condutor tire seus olhos da pista (Zwahlen e Schnell, 1999).

Sinalização rodoviária horizontal e idade são fatores que, conjuntamente, afetam a visibilidade de condução durante a noite. Zwahlen e Schnell (1999) avaliaram a distância de visibilidade para condutores jovens e idosos com diferentes tipos de pavimento e condições de iluminação. Os resultados indicaram que as distâncias eram 55% maiores para motoristas jovens.

Acredita-se que a presença das linhas de centro e de bordo possui potencial para reduzir a ocorrência de acidentes em até 20% (Miller, 1992). Musick (1962, *apud* Hauer, 2018) e Basile (1962, *apud* Hauer, 2018) avaliaram o efeito das primeiras implantações de linhas de bordo em trechos rodoviários nos Estados Unidos em relação ao número de acidentes. Os dois estudos concluíram que o número de acidentes havia reduzido em acessos, embora o motivo não tenha ficado claro, uma vez que não há linhas de bordo nesses pontos. Os dois estudos, entretanto, também concluíram que o número de acidentes nos segmentos entre os pontos de acesso havia sido maior que o esperado se não houvesse linhas de bordo.

2.3. Posicionamento lateral e segurança viária

Segundo a teoria de compensação de risco, o condutor tende a reagir a mudanças no ambiente viário. Esse modelo comportamental baseia-se na suposição que o condutor possui uma margem de segurança quando está dirigindo, e apenas quando essa margem é excedida é que seu comportamento é alterado (Summala, 1996). Logo quando há risco excessivo, o condutor age sobre os parâmetros de condução, alterando a velocidade ou a posição lateral do veículo na via, com o objetivo de voltar para a margem de segurança.

Nas situações em que há acostamento na pista, espera-se que o motorista pratique uma velocidade superior e posicione seu veículo mais afastado do eixo da pista quando comparado às situações sem acostamento, pois ele percebe uma maior margem de segurança para corrigir seu traçado devido a eventuais situações de emergência quando o acostamento está presente (Godley *et al.*, 2004). Espera-se o mesmo comportamento quando há defensas na lateral da pista, uma vez que a percepção de risco é diminuída (Ben-Bassat e Shinar, 2011).

Estudos em simuladores de direção mostraram que os condutores se posicionaram mais próximo do fluxo oposto – mais longe do bordo da pista – conforme a largura do acostamento diminuía (Ben-Bassat e Shinar, 2001), que a presença de acostamento fez com os que condutores se posicionassem mais longe do fluxo oposto quando comparados a situações onde não havia acostamento (Bella, 2013), que a marcação de pista afetou a posição lateral, isto é, os condutores dirigiram em uma posição central quando não havia marcação, enquanto se posicionaram mais próximo do bordo da pista quando a mesma foi separada em duas faixas após uma linha de centro ter sido adicionada (De Waard, 2004).

Acostamentos estreitos podem criar situações perigosas, nas quais o condutor não terá área suficiente para recuperar o controle do veículo em caso de emergência (Kraus *et al.*, 1993). Alguns estudos sobre largura de faixa mostram que, quando as faixas da via são estreitas, os condutores praticam uma menor variabilidade de posição lateral quando comparado às situações em que a via possui faixas largas (Dijksterhuis *et al.*, 2011; Godley *et al.*, 2004). Uma explicação para isso é que dirigir em faixas estreitas exige mais esforço por parte do motorista.

3. MÉTODO

Esta seção evidencia as diretrizes do estudo realizado. Será apresentado o simulador de direção imersivo utilizado, o cenário elaborado, o projeto de experimentos desenvolvido, os dados coletados, a análise de dados realizada e os procedimentos adotados na realização do experimento.

3.1. Simulador de direção

O simulador de direção utilizado neste estudo é do tipo imersivo (Figura 1). A imersão é caracterizada devido ao uso de óculos de realidade virtual – que proporciona ao condutor a sensação de estar presente no ambiente virtual e a possibilidade de visualizar o cenário desenvolvido em qualquer direção – e de fones de ouvido circo auricular, que permite o isolamento acústico do ambiente real. O simulador possui um *cockpit* instalado sobre uma plataforma dinâmica com dois graus de liberdade capaz de reproduzir as forças que atuam em um veículo em movimento.



Figura 1: Simulador de direção imersivo

Para tornar a condução dos participantes mais homogênea e evitar ruídos nos dados, o veículo foi configurado com câmbio automático. Os componentes como volante, pedal do freio, pedal do acelerador, espelhos e painel são semelhantes àqueles usados em veículos de passeio.

3.2. Cenário do estudo

O cenário de estudo foi um trecho rodoviário virtual elaborado na plataforma Unity. O trecho é composto por um segmento com extensão aproximada de 2500 metros de pista dupla em reta destinado à adaptação do condutor ao equipamento. Na sequência do trecho ocorre a transição para o segmento experimental propriamente dito. Nele é apresentado ao condutor um cenário rodoviário de pista simples em relevo ondulado com sucessão de trechos curvos e retilíneos e com aproximadamente 3200 metros de extensão. Foram desenvolvidas quatro combinações de cenários nessas condições: com linhas e dia, com linhas e noite, sem linhas e dia, sem linhas e noite (Figura 2).

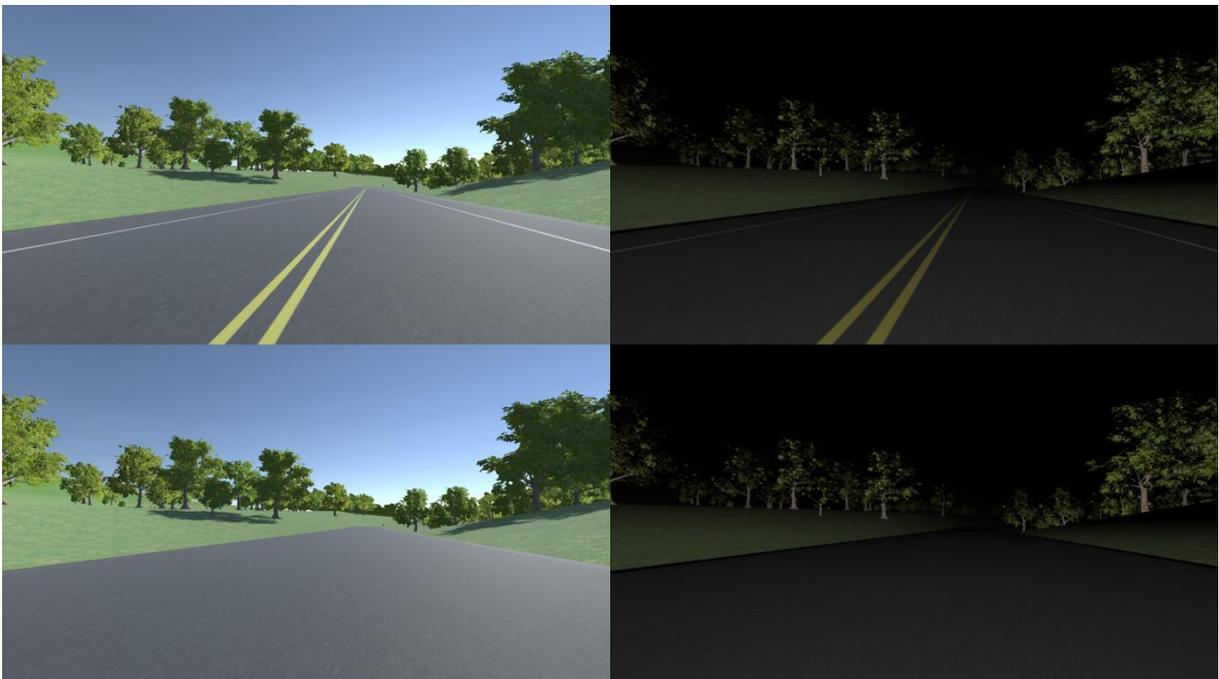


Figura 2: Ilustração dos diferentes cenários

As larguras da faixa e do acostamento eram de 4 e 3 metros respectivamente, e não havia defensas em nenhuma parte do trecho. Havia tráfego no sentido contrário composto tanto de veículos leves quanto de pesados, no entanto não havia tráfego no sentido em que o participante conduzia, sendo desnecessária manobras como ultrapassagem.

3.3. Projeto de experimentos

O estudo foi desenvolvido conforme um projeto de experimentos fatorial 2^k (quantidade “k” de fatores em dois níveis cada) com repetição e de quatro fatores controláveis: gênero do participante, idade do participante, luminosidade do ambiente e presença de linhas de centro e

de bordo na pista. O tamanho da amostra requerido para este estudo foi de 32 pessoas. Os níveis dos fatores controláveis podem ser visualizados na Tabela 1. A variável resposta do experimento foi a posição lateral média praticada pelos condutores no trecho experimental. Fatores como dia e horário de execução do experimento foram considerados como ruído.

Tabela 1: Níveis dos fatores controláveis

Fatores	Níveis	
Gênero	mulher	homem
Idade	19-30 anos	31-60 anos
Luminosidade	noite	dia
Linhas	sem	com

A divisão das faixas etárias foi definida com base no preço dos seguros automotivos, a fim de mantê-las homogêneas em relação ao estilo de condução. Exigiu-se que cada participante cumprisse três requisitos para participar: (i) possuir Carteira Nacional de Habilitação há pelo menos um ano; (ii) conduzir frequentemente em vias urbanas; e (iii) conduzir ocasionalmente em rodovias.

3.4. Coleta e análise de dados

A posição lateral e a dispersão das posições laterais praticadas pelos participantes em cada cenário virtual serão utilizadas como métrica de segurança viária, e os resultados deste estudo serão dados em diferenças relativas de segurança viária. Os dados coletados foram as características do condutor autodeclaradas: gênero e idade, e desempenho de condução: posição lateral em metros do limite da pista até a lateral do veículo a cada segundo. A medição da posição lateral pode ser visualizada elucidativamente na Figura 3, onde “LFO” indica a linha de divisão de fluxos opostos e “LBO” indica a linha de bordo.

Dado que a variável resposta definida para este estudo foi a posição lateral média praticada pelos participantes no trecho experimental, a análise estatística dos dados consistiu em verificar a existência de diferença significativa entre cada tratamento (nível), isto é, se os participantes conduziram mais longe ou mais afastado do bordo da pista em um cenário do que outro.

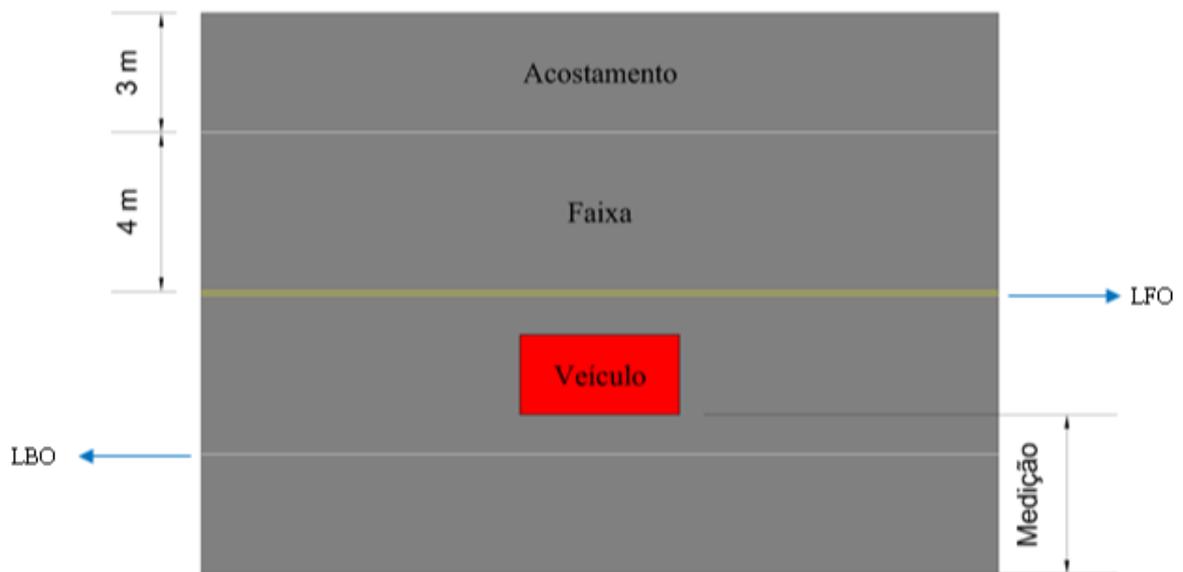


Figura 3: Medição da posição lateral

Para isso foi utilizada a análise de variância (ANOVA) do *software* Minitab – verificando tanto os efeitos de primeira quanto de segunda e de terceira ordem dos fatores controláveis com a variável resposta – e coeficiente de variação. Como a análise de variância pressupõe que as variâncias dos grupos são iguais estatisticamente, verificou-se a existência de homogeneidade de variâncias por meio do teste de Levene do *software* SPSS. Verificou-se, também, a normalidade dos resíduos por meio dos testes de Kolmogorov-Smirnov e Shapiro-Wilk.

3.5. Procedimentos adotados na realização do experimento

Inicialmente, cada participante preenchia um questionário onde informava seu gênero e sua idade e assinava um termo de consentimento relativo à sua participação no experimento. Em seguida, ele era conduzido até o equipamento e posicionado no simulador enquanto recebia as instruções básicas sobre seu uso. A partir desse momento, o participante iniciava a condução pelo segmento destinado à sua adaptação ao simulador sem ter sua velocidade coletada até o momento de transição para o segmento experimental. Ao ingressar no segmento experimental do cenário, o período de avaliação iniciava efetivamente e a velocidade praticada era registrada a cada 20 metros. Os participantes possuíam liberdade para desistir do experimento a qualquer momento caso desejassem, e seus dados seriam excluídos da análise.

4. RESULTADOS

A amostra pesquisada consistiu de 32 participantes voluntários, o que corresponde a um erro relativo de 4,4% na medição da posição lateral média, considerando um intervalo de confiança de 95%. Todos participantes percorreram um trecho experimental de 3200 metros, que resultou em um tempo total de condução de aproximadamente três minutos – período de exposição em ambiente imersivo associado à baixa ou nenhuma intensidade de sintomas de mal-estar conforme Nodari *et al.* (2017).

A Tabela 2 apresenta os resultados para o teste de Levene, o qual verifica se existe homogeneidade entre as variâncias dos grupos. O resultado do teste de 0,844 indica que a hipótese nula de que as variâncias são iguais não pode ser rejeitada.

Tabela 2: Teste de homogeneidade de variância

F	gl1	gl2	sig.
0,589	15	16	0,844

A Tabela 3 exhibe os resultados para os testes de normalidade dos resíduos Kolmogorov-Smirnov e Shapiro-Wilk. Os resultados de 0,2 e 0,815 nos testes indicam que a hipótese nula de que os resíduos seguem uma distribuição normal não pode ser rejeitada.

Tabela 3: Testes de normalidade dos resíduos

	Kolmogorov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
	Estatística	gl	sig.	Estatística	gl	sig.
Residual para Posição Lateral	0,105	32	0,2	0,981	32	0,815

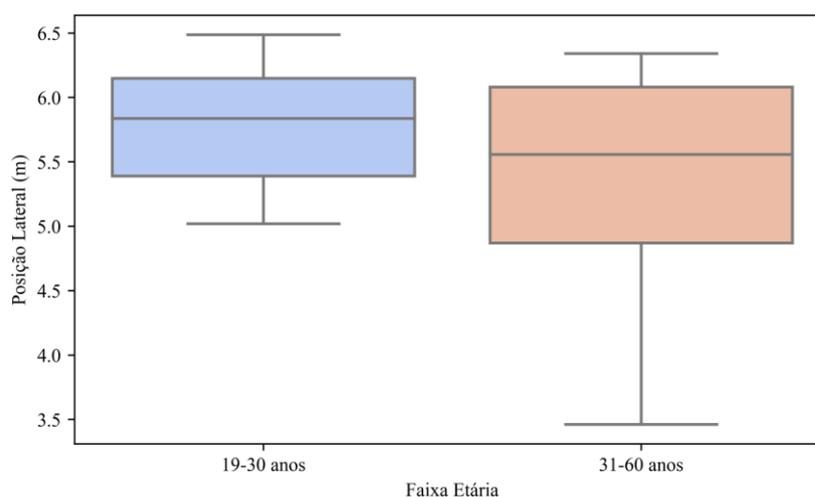
Dado que os resultados dos testes apresentados tanto na Tabela 2 quanto na Tabela 3 não puderam rejeitar a homogeneidade de variância entre os grupos e a normalidade dos resíduos, prossegue-se para o teste F da ANOVA cujo resultado se encontra na Tabela 4.

As variáveis independentes idade do participante, luminosidade do ambiente e presença das linhas de centro e de bordo indicaram possuir relação significativa com a variável resposta (posição lateral média) na pesquisa realizada. A interação de segunda ordem entre luminosidade do ambiente e presença das linhas de centro e de bordo também indicou possuir efeito significativo sobre a posição lateral praticada.

Tabela 4: Resumo da análise de variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Gênero	1	0,17	0,17	1,03	0,324
Idade	1	1,41	1,41	8,56	0,009
Luminosidade	1	0,85	0,85	5,15	0,037
Linhas	1	6,14	6,14	37,24	0,000
Gênero*Idade	1	0,13	0,13	0,77	0,393
Gênero*Luminosidade	1	0,04	0,04	0,23	0,639
Gênero*Linhas	1	0,69	0,69	4,18	0,057
Idade*Luminosidade	1	0,04	0,04	0,25	0,620
Idade*Linhas	1	0,67	0,67	4,05	0,060
Luminosidade*Linhas	1	1,12	1,12	6,80	0,018
Gênero*Idade*Luminosidade	1	0,00	0,00	0,03	0,875
Gênero*Idade*Linhas	1	0,52	0,52	3,14	0,094
Gênero*Luminosidade*Linhas	1	0,03	0,03	0,16	0,695
Idade*Luminosidade*Linhas	1	0,52	0,52	3,14	0,094

A variável independente gênero do participante não demonstrou influenciar estatisticamente sobre posição lateral. O fato de o condutor ser mulher ou homem foi indiferente quanto à sinuosidade do traçado realizado durante a condução neste experimento. A Figura 4 apresenta um gráfico *boxplot* da posição lateral em função da faixa etária. Observa-se que as máximas posições laterais assim como o percentil 75 para as duas faixas etárias foram semelhantes, no entanto todas as posições laterais registradas para os mais jovens estão contidas entre o quartil 25 e o máximo da faixa etária 31-60 anos.

**Figura 4:** *Boxplot* da posição lateral em função da faixa etária

Adicionalmente, a menor posição lateral medida pela faixa etária 31-60 anos é cerca de 1,50 metro inferior quando comparado à menor posição lateral da faixa etária 19-30 anos. Os condutores mais velhos possuíram uma variabilidade na posição lateral maior que aquela praticada pelos condutores mais jovens, indicando que podem ter desenvolvido um traçado mais sinuoso no trecho estudado.

A Figura 5 apresenta os efeitos de primeira ordem entre as variáveis independentes com a variável resposta. Observa-se que a faixa etária 31-60 anos conduziu aproximadamente 40 centímetros mais longe da linha de centro que a faixa etária 19-30 anos. Nos cenários diurnos, os participantes optaram por conduzir aproximadamente 30 centímetros mais longe da linha de centro, no entanto nos cenários onde as linhas não estavam presentes, eles preferiram conduzir mais afastado do eixo da pista, isto é, utilizaram parte do acostamento de maneira a centralizar o veículo no espaço disponível (faixa de rolamento mais acostamento).

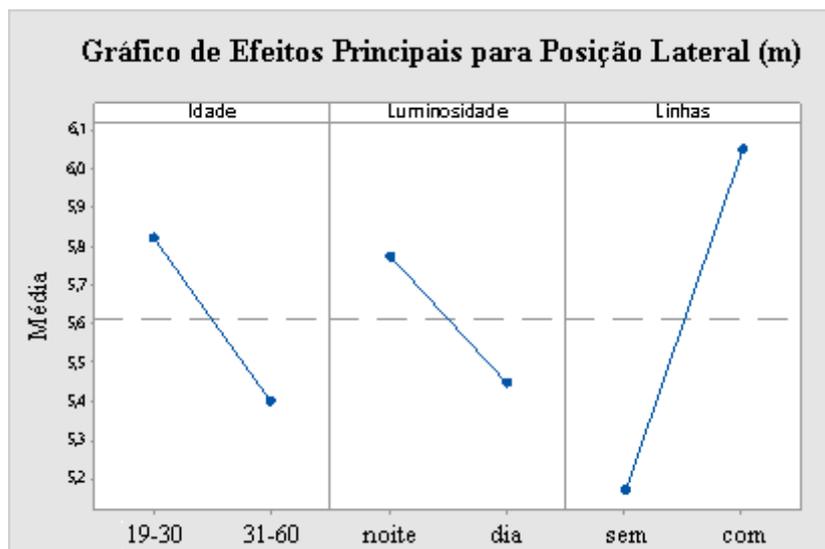


Figura 5: Efeitos de primeira ordem sobre a posição lateral

A interação de segunda ordem entre as variáveis luminosidade do ambiente e presença das linhas de centro e de bordo sobre a variável resposta pode ser visualizada na Figura 6. Nota-se que, quando as linhas estavam presentes, os motoristas optaram por conduzir mais próximo do fluxo oposto. Quando as linhas não estavam presentes, contudo, os condutores dirigiram 70 centímetros mais longe do fluxo oposto no cenário diurno quando comparado ao noturno.

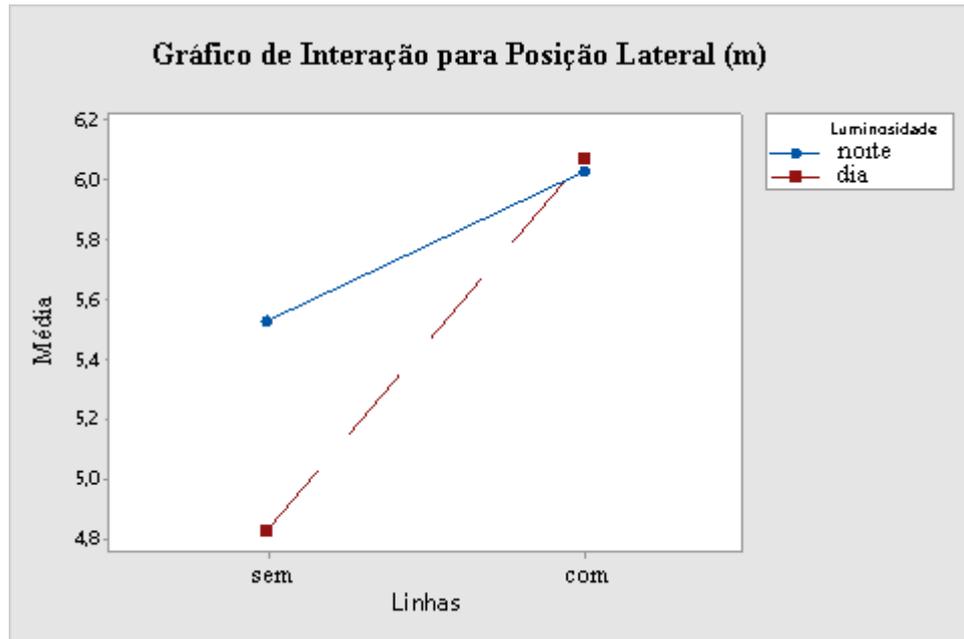


Figura 6: Interação de segunda ordem sobre a posição lateral

Algumas limitações foram identificadas durante o desenvolvimento deste experimento. A participação de condutores com idade superior a 60 anos poderia ter indicado resultados diferentes dos encontrados, pois estes podem possuir estilo de condução diferente dos mais jovens devido a diferentes percepções de risco, a diferentes experiências automobilísticas ou a limitações motoras. Em relação à luminosidade do ambiente, pode existir uma limitação do *software* empregado para desenvolver os cenários em prover um ambiente virtual suficientemente realista para reproduzir o comportamento do condutor com fidelidade. Optou-se, ainda, por manter fixa a largura da faixa de rolamento e do acostamento no desenvolvimento do projeto de experimentos, no entanto este parâmetro pode alterar o comportamento do condutor na via conforme relatado na literatura.

Uma análise de dispersão da posição lateral foi realizada por meio do coeficiente de variação de cada cenário. O resultado dessa análise pode ser visualizado na Tabela 5 e na Figura 7.

Tabela 5: Coeficiente de variação de cada cenário para a posição lateral

Posição Lateral	dia com linhas (1)	dia sem linhas (2)	noite com linhas (3)	noite sem linhas (4)
desvio-padrão (m)	0,23	0,70	0,38	0,56
média (m)	6,08	4,82	6,03	5,53
CV (%)	3,78	14,52	6,30	10,13

Ao comparar os pares de cenários tanto durante o dia (1) e (2) quanto durante a noite (3) e (4), é possível perceber que a dispersão das posições laterais é maior quando as linhas não estão presentes. Esse resultado está de acordo com o obtido pela análise de variância (ANOVA), a qual indicou que os motoristas preferiram utilizar todo espaço disponível (faixa de rolamento mais acostamento) para conduzir. Nos cenários diurnos (1) e (2), a maior posição lateral registrada na situação sem a presença das linhas foi inferior à menor posição lateral na situação com a presença das linhas. Nos cenários noturnos (3) e (4), todas as posições laterais registradas na situação sem linhas estão contidas no quartil 75 da situação com linhas.

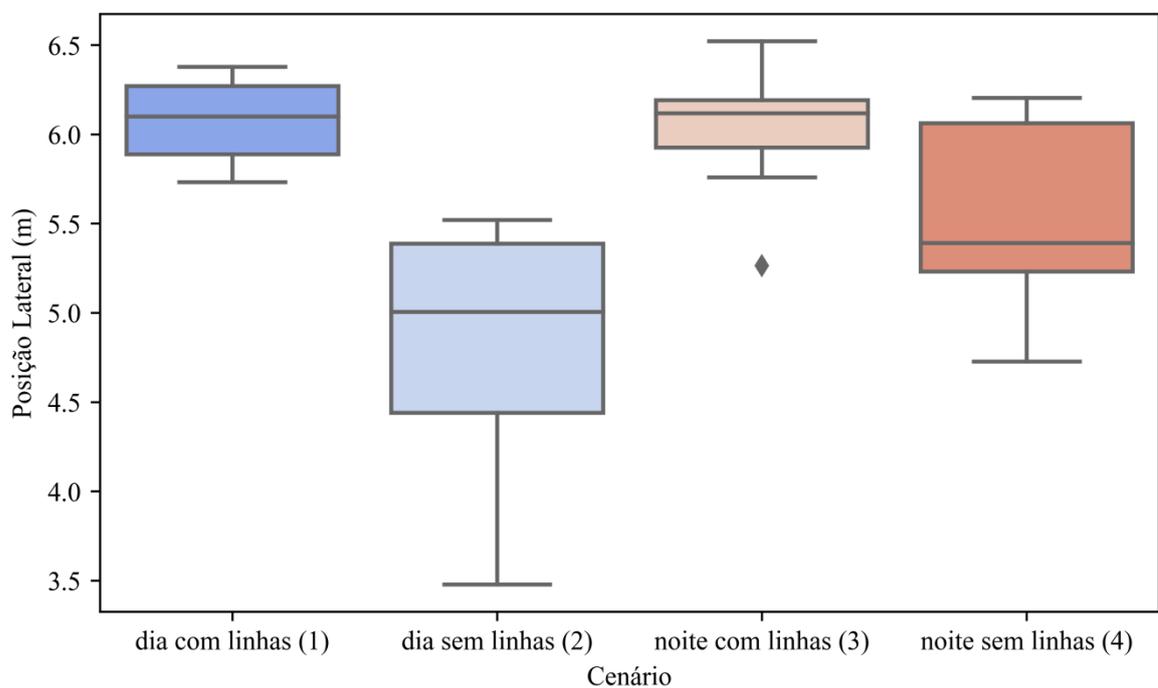


Figura 7: *Boxplot* da posição lateral em função do cenário

Este estudo possibilitou indicar algumas relações entre a idade do participante, a luminosidade do ambiente e a presença das linhas de centro e de bordo com a posição lateral praticada pelos condutores. Resultados relacionados à idade indicaram que condutores com mais idade dirigiram mais longe do fluxo oposto em comparação aos com menos idade, o que pode indicar a existência de diferentes percepções de risco entre os grupos e que podem estar relacionadas ao tempo de experiência automobilística ou a fatores comportamentais. Resultados relacionados à luminosidade do ambiente apontaram que os condutores preferiram dirigir mais perto do fluxo oposto quando não havia luz, situação que pode ter ocorrido devido a uma maior dificuldade de visualizar tanto a via à frente quanto a aproximação dos

veículos do fluxo oposto, embora estes possuíssem faróis. Resultados relacionados à presença das linhas de centro e de bordo na pista indicaram estar de acordo com a literatura revisada.

Quando não existiam linhas, os condutores preferiram utilizar o espaço extra do acostamento para desenvolver seus traçados, resultando em uma posição lateral média mais longe do fluxo oposto e mais perto do bordo da pista. Essa preferência pode ser explicada pela teoria de compensação de risco discutida por Summala (1996), na qual os condutores percebem que há mais espaço para corrigir eventuais situações de emergência – como saída de pista – ou para diminuir a chance de colisões frontais. Cenários que não possuíam linhas apresentaram maior variabilidade da posição lateral, demonstrando que os condutores praticaram um traçado mais sinuoso. A variabilidade pode estar associada à percepção de risco, isto é, como os condutores podem ter se sentido mais seguros quando não havia linhas, o esforço de condução exigido para eles foi menor.

A métrica utilizada para avaliar a segurança viária neste estudo foi influenciada na análise de variância (ANOVA) por interações de primeira e de segunda ordem. Algumas limitações foram levantadas com o objetivo de justificar resultados inconclusivos. Enfatiza-se, entretanto, que a discussão realizada por Hauer (2018), na qual medidas de segurança viária não devem ser realizadas baseadas apenas em opinião permanece. É necessário, portanto, levar em conta que tanto parâmetros de sinalização rodoviária quanto medidas de segurança viária podem alterar o comportamento condutor, o que influencia novamente na segurança viária.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve por objetivo estimar o efeito que a luminosidade do ambiente e a presença das linhas de centro e de bordo de uma rodovia provocam sobre a posição lateral praticada por condutores – parâmetro que foi utilizado como métrica para analisar a segurança viária. Para isso foram desenvolvidas, para um simulador de direção imersivo, quatro versões de um cenário rodoviário virtual: com linhas e dia, com linhas e noite, sem linhas e dia, sem linhas e noite. Cada versão possuía dois segmentos, sendo o primeiro de adaptação com aproximadamente 2500 metros, e o segundo o experimental com aproximadamente 3200 metros.

De forma a atender ao objetivo deste artigo, uma amostra de 32 participantes, definida de acordo com um projeto de experimentos de quatro fatores controláveis (gênero do participante, idade do participante, luminosidade do ambiente e presença das linhas de centro e de bordo na pista), foi submetida à condução nos cenários desenvolvidos. Cada participante conduziu apenas em uma das versões por um tempo aproximado de três minutos para mitigar possíveis efeitos de mal-estar. Com os dados coletados das posições laterais de cada condutor no segmento experimental, foram realizadas análise de variância e análise de dispersão para verificar diferenças de posição lateral praticada entre a condução em cada cenário. Entre os resultados, destacam-se:

- Os motoristas jovens conduziram mais próximo do fluxo oposto que os mais velhos, embora tenham desenvolvido menor variabilidade da posição lateral;
- Na condução diurna, os participantes optaram por se posicionar mais afastado do fluxo oposto, enquanto na noturna mais próximo;
- Sem a presença das linhas de centro e de bordo, os condutores preferiram utilizar o espaço da faixa de rolamento e do acostamento para desenvolver seus traçados.

Agradecimentos

Os autores agradecem às empresas MO3 e BS Motion pelo apoio na realização do experimento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Al-Shihabi, T. e R. R. Mourant (2003) Toward More Realistic Driving Behavior Models for Autonomous Vehicles in Driving Simulators. *Transportation Research Record*, v. 1843, p. 41-49.
- Bélanger, A.; S. Gagnon e S. Yamin (2010) Capturing the Serial Nature of Older Drivers' Responses Towards Challenging Events: A Simulator Study. *Accident Analysis and Prevention*, v. 42, p. 809-817.
- Bella, F. (2008) Driving Simulator for Speed Research on Two-Lane Rural Roads. *Accident Analysis and Prevention*, v. 40, p. 1078-1087.
- Bella, F. (2013) Driver Perception of Roadside Configurations on Two-Lane Rural Roads: Effects on Speed and Lateral Placement. *Accident Analysis and Prevention*, v. 50, p. 251-262.
- Bella, F. (2014) Driver Perception Hypothesis: Driving Simulator Study. *Transportation*

- Research Part F*, v. 24, p. 183-196.
- Bella, F. (2015) Coordination of Horizontal and Sag Vertical Curves on Two-Lane Rural Roads: Driving Simulator Study. *International Association of Traffic and Safety Sciences (IATSS)*, v. 39, p. 51-57.
- Ben-Bassat, T. e D. Shinar (2011) Effect of Shoulder Width, Guardrail and Roadway Geometry on Driver Perception and Behavior. *Accident Analysis and Prevention*, v. 43(6), p. 2142-2152.
- Blana, E. (1996) Driving Simulator Validation Studies: A Literature Review. Working Paper 480. Institute of Transport Studies, University of Leeds, UK.
- Brooks, J. O.; R. R. Goodenough; M. C. Crisler; N. D. Klein; R. L. Alley; B. L. Koon; W. C. Logan Jr.; J. H. Ogle; R. A. Tyrrell e R. F. Wills (2010) Simulator Sickness During Driving Simulation Studies. *Accident Analysis and Prevention*, v. 42, p. 788-796.
- Charlton, S. G. (2007) Delineation Effects in Overtaking Lane Design. *Transportation Research Part F*, v. 10, p. 153-163.
- Clarke, D. D.; P. Ward; C. Bartle e W. Truman (2006) Young Driver Accidents in the UK: The Influence of Age, Experience, and Time of Day. *Accident Analysis and Prevention*, v. 38, p. 871-878.
- Classen, S.; M. Bewernitz e O. Shechtman (2011) Driving Simulator Sickness: An Evidence-Based Review of the Literature. *American Journal of Occupational Therapy*, v. 65, p. 179-188.
- De Waard, D.; F. J. J. M. Steyvers e K. A. Brookhuis (2004) How Much Visual Road Information is Needed to Drive Safely and Comfortably?. *Safety Science*, v. 42(7), p. 639-655.
- Dijksterhuis, C.; K. A. Brookhuis e D. De Waard (2011) Effects of Steering Demand on Lane Keeping Behaviour, Self-Reports, and Physiology: A Simulator Study. *Accident Analysis and Prevention*, v. 43(3), p. 1074-1081.
- DNIT (2010) Manual de Sinalização Rodoviária. Ministério dos Transportes, Rio de Janeiro.
- Domeyer, J. E.; N. D. Cassavaugh e R. W. Backs (2013) The Use of Adaptation to Reduce Simulator Sickness in Driving Assessment and Research. *Accident Analysis and Prevention*, v. 53, p. 127-132.
- Elliott, M. A.; V. A. McColl e J. V. Kennedy (2003) Road Design Measures to Reduce Drivers' Speed via Psychological Processes: A Literature Review. TRL Report TRL564.
- Fors, C. e S. Lundkvist (2009) Night-time Traffic in Urban Area: A Literature Review on

- Road Users Aspects. The Swedish Road Administration. VTI Rapport 650A.
- Godley, S. T.; T. J. Triggs e B. N. Fildes (2004) Perceptual Lane Width, Wide Perceptual Road Centre Markings and Driving Speeds. *Ergonomics*, v. 47(3), p. 237-256.
- Hauer, E. (2018) Road Safety Research and Practice: Problems of Coexistence. Disponível em:
<https://www.researchgate.net/profile/Ezra_Hauer/publication/322775312_Road_safety_research_and_practice_problems_of_coexistence/links/5a6f85e1458515015e61643b/Road-safety-research-and-practice-problems-of-coexistence.pdf>. Acesso em: 05 jul. 2018.
- Kennedy, R. S.; K. M. Stanney e W. P. Dunlap (2000) Duration and Exposure to Virtual Environments: Sickness Curves During and Across Sessions. *Presence*, v. 9, p. 463-472.
- Kraus, J. F.; C. L. Anderson; S. Arzemanian; M. Salatka; P. Hemyari e G. Sun (1993) Epidemiological Aspects of Fatal and Severe Injury Urban Freeway Crashes. *Accident Analysis and Prevention*, v. 25(3), p. 229-239.
- Larocca, A. P. C.; R. L. Ribeiro; A. C. Figueira; P. T. M. S. de Oliveira; L. C. Lulio e M. A. C. Rangel (2018) Analysis of Perception of Vertical Signaling of Highways by Drivers in a Simulated Driving Environment. *Transportation Research Part F*, v. 58, p. 471-487.
- Miller, T. R. (1992) Benefit-Cost Analysis of Lane Marking. *Transportation Research Record*, v. 1334, p. 38-45.
- Mourant, R. R. e M. T. Schultheis (2001) A HMD Based Virtual Reality Driving Simulator. *Proceedings of the First International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design*. Aspen, USA.
- Nodari, C. T.; M. C. de Oliveira; M. R. Veronez; F. Bordin; L. Gonzaga Jr.; A. P. C. Larocca e C. Framarim (2017) Avaliação do Realismo e da Sensação de Mal-Estar (Simulator Sickness) no Uso de Simulador Imersivo de Direção. *Anais do XXXI Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, ANPET, Recife, v. 1, p. 3103-3115.
- Owens, D. A. e M. Sivak (1996) Differentiation of Visibility and Alcohol as Contributors to Twilight Road Fatalities. *Human Factors*, v. 38(4), p. 680-689.
- Plainis, S. e I. J. Murray (2002) Reaction Times as an Index of Visual Conspicuity when Driving at Night. *Ophthal. Physiol.*, v.22, p. 409-415.
- Reinhard, R. T.; M. Kleer e K. Drebler (2018) The Impact of Individual Simulator Experiences on Usability and Driving Behavior in a Moving Base Driving Simulator.

Transportation Research Part F, in press.

- Smart, L. J.; T. A. Stoffregen e B. G. Bardy (2002) Visually Induced Motion Sickness Predicted by Postural Instability. *Human Factors*, v. 44, p. 451-465.
- Summala, H. (1996) Accident Risk and Driver Behaviour. *Safety Science*, v. 22(1-3), p. 103-117.
- Vollrath, M. e J. Fischer (2017) When Does Alcohol Hurt? A Driving Simulator Study. *Accident Analysis and Prevention*, v. 109. p. 89-98.
- Weller, G.; B. Schlag; T. Friedel e C. Rammin (2008) Behaviourally Relevant Road Categorisation: A Step Towards Self-Explaining Rural Roads. *Accident Analysis and Prevention*, v. 40, p. 1581-1588.
- Williams, A. F. (2013) Teenage Drivers: Patterns of Risk. *Journal of Safety Research*, v. 34, p. 5-15.
- Wu, Y.; X. Zhao; J. Rong e Y. Zhang (2018) The Effectiveness of Eco-Driving Training for Male Professional and Non-Professional Drivers. *Transportation Research Part D*, v. 59, p. 121-133.
- Zoller, I.; B. Abendroth e R. Bruder (2017) Driver Behaviour Validity in Driving Simulators – Analysis of the Moment of Initiation of Braking at Urban Intersections. *Transportation Research Part F*, in press.
- Zwahlen, H. T. e T. Schnell (1999) Visibility of Road Markings as a Function of Age, Retroreflectivity Under Low-Beam and High-Beam Illumination at Night. *Transportation Research Record*, v. 1692, p. 152-163.

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES

Esta dissertação abordou o tema da influência da luminosidade do ambiente e de sinalização rodoviária horizontal sobre a condução de veículos em rodovias de pista simples. Para atender ao objetivo do trabalho de estimar os impactos da variação da luminosidade do ambiente e da presença das linhas de centro e de bordo na pista no perfil de velocidade e no posicionamento do veículo praticado por condutores, utilizou-se um simulador de direção em ambiente imersivo. Sabe-se que os motivos dos acidentes de trânsito estão compreendidos em fatores viário-ambientais, humanos e veiculares. Os fatores viário-ambientais incluem parâmetros de sinalização horizontal – como presença das linhas de centro e de bordo –, luminosidade do ambiente, entre outros. Mudanças nesses fatores podem influenciar no comportamento do condutor na via (fator humano). O condutor, por consequência, pode alterar a velocidade e o posicionamento do veículo na pista.

Uma vez que investigar os efeitos dos fatores viário-ambientais em campo pode ser uma tarefa difícil, pois nem sempre eles agem isoladamente, recorreu-se ao uso de simuladores de direção para estudar os efeitos da luz do ambiente e de sinalização horizontal na segurança em rodovias. Essa ferramenta possibilitou investigar o efeito das variáveis isolada ou conjuntamente devido a atributos como a possibilidade de controlar as variáveis de interesse, proporcionou um ambiente seguro aos participantes e possibilitou a obtenção de uma amostra adequada. O simulador utilizado nesta pesquisa foi do tipo imersivo, no qual o condutor utiliza óculos de realidade virtual para se sentir presente no ambiente rodoviário virtual desenvolvido. A imersão possibilita que o participante enxergue em qualquer direção do cenário virtual e permite a reprodução do comportamento de modo mais fiel à realidade do que em simuladores não imersivos.

Atendendo ao objetivo específico “análise da influência do gênero e da idade do condutor sobre os parâmetros estudados” foi possível concluir que tanto o gênero quanto a idade do condutor interferiram nos parâmetros de condução. As análises estatísticas dos dados por teste de hipóteses (teste t) e por análise de variância (ANOVA) indicaram que o gênero e a idade influenciaram na velocidade praticada durante a condução nas diferentes configurações de cenários (com e sem a presença das linhas de centro e de bordo). Nesta

pesquisa, o gênero masculino tendeu a conduzir mais rápido que o feminino, e os condutores com mais idade tenderam a conduzir mais devagar que os mais novos.

Os resultados encontrados no primeiro e no segundo artigo desta dissertação indicaram que a presença das linhas de centro e de bordo alterou a velocidade praticada pelas diferentes faixas etárias e gêneros dos participantes. Como a velocidade em rodovias é considerada um fator determinante na segurança viária, pois tanto a velocidade média quanto a variabilidade da velocidade influenciam na ocorrência e severidade de acidentes (HAUER, 2009; ELVIK, 2013; ELVIK, 2019; NILSSON, 2004), o papel das linhas de centro e de bordo na provisão de ambientes viários seguros torna-se suscetível a questionamentos (HAUER, 2018). No terceiro artigo, a posição lateral na pista pode ter sido alterada em função da percepção dos condutores sobre o espaço disponível para corrigir eventuais situações de emergência como saída de pista ou colisões frontais. Os resultados obtidos podem ser explicados pela teoria de compensação de risco discutida por Summala (1996). Esse modelo comportamental supõe que o motorista possui uma margem de segurança quando está conduzindo, e seu comportamento é ajustado quando essa margem é excedida.

Embora os resultados dos experimentos não tenham convergido para uma solução única quanto à presença das linhas de centro e de bordo que beneficie todas as situações simultaneamente (faixa etárias e gêneros dos condutores e luminosidade do ambiente), esta dissertação corrobora com a importância do fomento a discussões sobre a eficácia dessas linhas para a segurança viária. Entende-se que, para ambientes rodoviários – principalmente no cenário brasileiro –, os manuais de sinalização rodoviária podem ficar defasados comparativamente ao estado da arte, às mudanças comportamentais dos motoristas e às alterações nos fatores viário-ambientais. Desta forma, deve-se questionar a implantação e a execução de normas de sinalização horizontal ao passo que tais medidas podem deixar de beneficiar os usuários da via no decorrer do tempo. Adicionalmente, os resultados e as discussões desta dissertação permitem que gestores e departamentos de trânsito atuem – por meio de campanhas de conscientização por exemplo – para aumentar a segurança viária das situações de risco relacionadas às faixas etárias e aos gêneros dos condutores. Ainda se salienta a importante questão debatida por Hauer (2018), na qual uma medida de segurança viária não deve ser realizada baseada apenas em opinião.

O uso de simuladores de direção tem oferecido novas oportunidades de investigação em segurança viária com evidência técnica e sem risco de acidentes aos envolvidos, embora

ainda existam limitações em ambiente virtual simulado. Os cenários virtuais desenvolvidos – principalmente os noturnos – podem não ter sido suficientemente realistas para reproduzir com fidelidade o comportamento dos condutores. Um possível motivo está associado ao *software* utilizado para desenvolvê-los, no entanto os avanços tecnológicos têm potencial de mitigar essa limitação. Ademais, o tempo de experimento também pode ter influenciado nos resultados, todavia este foi limitado de modo a não provocar sintomas de mal-estar (*simulator sickness*) nos participantes.

Recomenda-se para trabalhos futuros a inclusão de novos fatores controláveis – como largura de faixa, largura de acostamento, presença de defensas, fluxo no mesmo sentido, presença de árvores no ambiente, mais níveis de luminosidade do ambiente, tempo de experimento – e de novas variáveis resposta como aceleração, *jerk* e frenagem. Por fim, dado que, conforme relatado na literatura, fatores como luminosidade do ambiente e presenças das linhas de centro e de bordo na pista podem impactar na segurança viária, a relevância deste trabalho no meio científico é ressaltada.

REFERÊNCIAS

- CHARLTON, S. G.; STARKEY, N. J.; MALHOTRA, N. Using Road Markings as a Continuous Cue for Speed Choice. **Accident Analysis and Prevention**, v. 117, p. 288-297, 2018.
- CLARKE, D. D.; WARD, P.; BARTLE, C.; TRUMAN, W. Young Driver Accidents in the UK: The Influence of Age, Experience, and Time of Day. **Accident Analysis and Prevention**, v. 38, p. 871-878, 2006.
- CNT. **Anuário CNT do Transporte**. Brasília, 2017.
- CNT. **Acidentes Rodoviários e a Infraestrutura**. Brasília, 2018.
- DNIT. **Manual de Sinalização Rodoviária**. Ministério dos Transportes, Rio de Janeiro, 2010.
- ELVIK, R. A Re-Parameterisation of the Power Model of the Relationship Between the Speed of Traffic and the Number of Accidents and Accident Victims. **Accident Analysis and Prevention**, v. 50, p. 854-860, 2013.
- ELVIK, R.; VADEBY, A.; HELS, T.; VAN SCHAGEN, I. (2019) Updated Estimates of the Relationship Between Speed and Road Safety at the Aggregate and Individual Levels. **Accident Analysis and Prevention**, v. 123, p. 114-122, 2019.
- FILDES, B. N.; FLETCHER, M. R.; CORRIGAN, J. McM. **Speed Perception 1: Drivers' Judgements of Safety and Speed on Urban and Rural Straight Roads**. Report CR 54. Federal Office of Road Safety. Canberra, Australia, 1987.
- GARBER, N. J.; EHRHART, A. A. Effect of Speed, Flow, and Geometric Characteristics on Crash Frequency for Two-Lane Highways. **Transportation Research Record**, v. 1717, p. 76-83, 2000.
- HAUER, E. Speed and Safety. **Transportation Research Record**, v. 2103, p. 10-17, 2009.
- HAUER, E. **Road Safety Research and Practice: Problems of Coexistence**. 2018.
Disponível em:
<https://www.researchgate.net/profile/Ezra_Hauer/publication/322775312_Road_safety_research_and_practice_problems_of_coexistence/links/5a6f85e1458515015e61643b/Road-safety-research-and-practice-problems-of-coexistence.pdf>. Acesso em: 05 jul. 2018.
- MILLER, T. R. Benefit-Cost Analysis of Lane Marking. **Transportation Research Record**, v. 1334, p. 38-45, 1992.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL. **Highway Safety Manual**. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, 2010.

- NILSSON, G. **Traffic Safety Dimensions and the Power Model to Describe the Effect of Speed on Safety**. 2004. 111f. Tese de Doutorado – Lund Institute of Technology, Sweden, 2004.
- OWENS, D. A.; SIVAK, M. Differentiation of Visibility and Alcohol as Contributors to Twilight Road Fatalities. **Human Factors**, v. 38(4), p. 680-689, 1996.
- PLAINIS, S.; MURRAY, I., J. Reaction Times as an Index of Visual Conspicuity when Driving at Night. **Ophthal. Physiol.**, v.22, p. 409-415, 2002.
- RANNEY, T. A.; GAWRON, V. J. The Effects of Pavement Edgelines on Performance in a Driving Simulator Under Sober and Alcohol-Dosed Conditions. **Human Factors**, v. 28(5), p. 511-525, 1986.
- SUMMALA, H. Accident Risk and Driver Behaviour. **Safety Science**, v. 22(1-3), p. 103-117, 1996.
- VADEBY, A.; FORSMAN, A. Traffic Safety Effects of New Speed Limits in Sweden. **Accident Analysis and Prevention**, v. 114, p. 34-39, 2018.
- VAN NES, N.; BRANDENBURG, S.; TWISK, D. Improving Homogeneity by Dynamic Speed Limit Systems. **Accident Analysis and Prevention**, v. 42, p. 944-952, 2010.
- WHO. **Global Status Report on Road Safety 2018**. World Health Organization. Geneva, 2018.
- WILLIAMS, A. F. Teenage Drivers: Patterns of Risk. **Journal of Safety Research**, v. 34, p. 5-15, 2013.
- ZWAHLEN, H. T.; SCHNELL, T. Visibility of Road Markings as a Function of Age, Retroreflectivity Under Low-Beam and High-Beam Illumination at Night. **Transportation Research Record**, v. 1692, p. 152-163, 1999.