



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES

MATEUS NOGUEIRA SILVA

FATORES DE RISCO ASSOCIADOS À SEVERIDADE DE ATROPELAMENTOS
EM ÁREAS URBANAS: UMA ANÁLISE CATEGÓRICA TEMPORAL

FORTALEZA-CE

2021

MATEUS NOGUEIRA SILVA

FATORES DE RISCO ASSOCIADOS À SEVERIDADE DE ATROPELAMENTOS EM
ÁREAS URBANAS: UMA ANÁLISE CATEGÓRICA TEMPORAL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Transportes.

Orientador: Prof. Dr. Flávio José Craveiro
Cunto

Coorientador: Prof. Dr. Marcos José Timbó
Lima Gomes

FORTALEZA-CE

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- S581f Silva, Mateus.
Fatores de risco associados à severidade de atropelamentos em áreas urbanas: uma análise categórica temporal. / Mateus Silva. – 2021.
86 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Fortaleza, 2021.
Orientação: Prof. Dr. Flávio José Craveiro Cunto.
Coorientação: Prof. Dr. Marcos José Timbó Lima Gomes.
1. severidade dos atropelamentos. 2. pedestres. 3. modelos categóricos. 4. heterogeneidade não observada. 5. variações temporais. I. Título.

CDD 388

MATEUS NOGUEIRA SILVA

FATORES DE RISCO ASSOCIADOS À SEVERIDADE DE ATROPELAMENTOS EM
ÁREAS URBANAS: UMA ANÁLISE CATEGÓRICA TEMPORAL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Transportes.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Ph.D. Flávio José Craveiro Cunto (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Marcos José Timbó Lima Gomes (Coorientador)
Universidade Federal do Cariri (UFCA)

Prof. Ph.D. Manoel Mendonça de Castro Neto
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof^ª. Dr^ª. Christine Tessele Nodari
Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

Aos meus avós Manoel (“*Dó
Beco*”), Maria Socorro,
Sebastião (“*Balá*”) e Geralda
(*In memoriam*), dedico.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me guiar todos os dias de minha vida.

A minha família, Marcelo, Emanuela, Giovana e João, minha base e os principais responsáveis por mais essa conquista, pelo amor, apoio e incentivo em todos os momentos de minha vida.

Aos meus tios Edmundo e Jôse por me acolherem em sua casa e me darem todo o suporte e apoio necessário durante esse período. E à minha tia Eluisa por me incentivar desde criança a seguir o caminho da educação.

Aos meus orientadores, Prof. Flávio Cunto e Prof. Marcos Timbó, pela motivação, ensinamentos, paciência e amizade ao longo deste trabalho.

Aos professores participantes das bancas de qualificação e de defesa, Prof^o Manoel Mendonça e a Prof^a Christine Nodari, pela atenção e contribuições para a conclusão desse trabalho.

Aos queridos amigos do mestrado, Mayara e Gabriel, pela amizade, parceria e por dividirem comigo, além dos momentos alegres, os instantes de angústia e preocupação durante o curso. E aos membros do grupo de pesquisa, em especial a Vanessa, Caio, Altanízio e Lucas pelas discussões e contribuições para esse trabalho.

Aos amigos do Cariri que mesmo distantes sempre se fizeram presentes, e em especial ao grande Vicente que embarcou comigo nessa jornada da pós-graduação e nas aventuras da capital, por toda a parceria e amizade ao longo desse tempo.

Aos queridos Marcelo e Bruno por todo apoio e incentivo nos últimos meses desse ciclo.

À Universidade Federal do Ceará e a todos os professores do PETRAN que contribuíram com o meu desenvolvimento acadêmico e profissional.

À FUNCAP (Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pela concessão da bolsa durante todo o período de realização deste mestrado.

Aos demais que não foram citados, mas que contribuíram de forma direta ou indireta para a realização desse sonho.

A todos o meu Muito Obrigado!

RESUMO

A aplicação de medidas para garantir a segurança e priorização dos pedestres requer uma compreensão dos fatores de risco associados às lesões em acidentes de trânsito. Modelos categóricos são comumente empregados para essa finalidade. Essa pesquisa tem como objetivo efetivar uma análise confirmatória a respeito dos fatores que influenciam a severidade de atropelamentos, considerando diferentes agregações dos níveis de severidade, heterogeneidade não observada nos fatores e possíveis variações temporais durante a década de ação pela segurança no trânsito em Fortaleza. Para isso, foi proposto, inicialmente, um modelo teórico a ser confirmado com os aspectos que se acredita ter influência no resultado das lesões. Modelos categóricos com diferentes níveis de agregação da severidade foram estimados para a confirmação do modelo teórico e análise da influência dessa agregação na modelagem. Além disso foi estimado um modelo de parâmetros aleatórios para incorporar uma possível heterogeneidade não observada. Para avaliar possíveis mudanças nos fatores de risco ao longo do tempo foram ainda estimados modelos categóricos para três períodos entre os anos de 2008 e 2019. Os resultados indicaram que a combinação de alguns níveis de gravidade pode levar a diferentes variáveis significativas e, assim, dependendo da especificação da variável resposta, a influência de fatores de risco importantes pode acabar sendo ignorada no modelo. Além disso, o modelo com três categorias de gravidade (leve/moderada, grave e fatal) apresentou o melhor desempenho em termos de ajuste do modelo. Dos fatores investigados apenas a variável referente a idade superior a 60 anos do pedestre obteve um parâmetro aleatório significativo. A heterogeneidade nas observações pode estar associada neste caso, entre outros fatores, à fragilidade física do corpo e a função cognitiva que pode diferir entre os indivíduos desse grupo. Observou-se ainda desse modelo que acidentes ocorridos à noite, com veículos pesados, nos finais de semana e localizados em vias com maior classificação viária estão associados a lesões mais graves. Por fim, a partir da análise temporal ficou evidente uma mudança no perfil da severidade dos acidentes envolvendo pedestres na cidade de Fortaleza ao longo desses 12 anos. Apesar de não ser possível afirmar que essa mudança advém de ações específicas aplicadas à cidade, os resultados aqui apresentados indicam uma melhoria na segurança viária para esses usuários, em consonância com os objetivos da Abordagem dos Sistemas Seguros e da Década de Ação pela Segurança no Trânsito de reduzir as lesões graves e fatais no trânsito.

Palavras-Chave: severidade dos atropelamentos, pedestres, modelos categóricos, heterogeneidade não observada, variações temporais.

ABSTRACT

The application of measures to ensure the safety and prioritization of pedestrians requires an understanding of the risk factors associated with injuries in crashes. Categorical models are commonly used for this purpose. This research aims to carry out a confirmatory analysis regarding the factors that influence the severity of being run over, considering different aggregations of severity levels, unobserved heterogeneity in the factors and possible temporal variations during the Decade of Action for Road Safety in Fortaleza. For this, it was initially proposed a theoretical model to be confirmed with the aspects that are believed to have an influence on the outcome of the injuries. Categorical models with different levels of severity aggregation were estimated to confirm the theoretical model and analyze the influence of this aggregation on the modeling. In addition, a model of random parameters was estimated to incorporate a possible unobserved heterogeneity. To assess possible changes in risk factors over time, categorical models were also estimated for three periods between the years 2008 and 2019. The results indicated that the combination of some levels of severity can lead to different significant variables and, thus, depending on of specifying the response variable, the influence of important risk factors may end up being ignored in the model. In addition, the model with three severity categories (mild/moderate, severe and fatal) showed the best performance in terms of adjusting the model. Of the factors investigated, only the variable referring to the pedestrian's age over 60 obtained a significant random parameter. The heterogeneity in the observations may be associated in this case, among other factors, with the physical fragility of the body and the cognitive function that may differ between individuals in this group. It was also observed from this model that crashes that occurred at night, with heavy vehicles, on weekends and located on roads with a higher road classification are associated with more serious injuries. Finally, from the temporal analysis, a change in the profile of the severity of crashes involving pedestrians in the city of Fortaleza was evident over these 12 years. Although it is not possible to state that this change comes from specific actions applied to the city, the results presented here indicate an improvement in road safety for these users, in line with the objectives of the Safe Systems Approach and the Decade of Action for Road Safety to reduce serious and fatal traffic injuries.

Keywords: severity of crashes with pedestrians, categorical models, unobserved heterogeneity, temporal variations.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Risco de morte de pedestres em função da velocidade de impacto com o veículo...	18
Figura 2: Distribuição das lesões em atropelamentos.	19
Figura 3: Dimensões dos Sistemas Seguros	21
Figura 4: Ilustração da limitação do modelo ordenado padrão aplicado à gravidade da lesão por acidente.....	33
Figura 5: Fluxograma das etapas do método	40
Figura 6: Arranjos dos níveis de severidade de cada modelo investigado	42
Figura 7: Frequência de observações	48
Figura 8: Modelo teórico base	50
Figura 9: Modelo Teórico.....	53
Figura 10: Distribuição do parâmetro - Ida_M60.....	60
Figura 11: Marcos do Gerenciamento de velocidade em Fortaleza	65
Figura 12: Distribuição de frequência da severidade por período de tempo.	66
Figura 13: Variação nas probabilidades previstas com o tempo em um acidente hipotético ...	68
Figura 14: Variação nas probabilidades previstas para os fatores Ida_31_60 e Ida_M60	71
Figura 15: Variação nas probabilidades previstas para os fatores Veic_Pes e Via_Exp.....	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Matriz de Haddon para entender os fatores de lesão em acidentes de trânsito	20
Tabela 2: Exemplos de fatores que afetam a escolha de velocidade dos condutores	22
Tabela 3: Estudos anteriores sobre análise da severidade de acidentes com pedestres.....	37
Tabela 4: Descrição das variáveis independentes e proporção na amostra	54
Tabela 5: Resultados da estimativa dos modelos logit multinomiais	56
Tabela 6: Resultados da estimativa do modelo de parâmetros aleatórios	60
Tabela 7: Cenário referência.....	63
Tabela 8: Pseudoelasticidade	64
Tabela 9: Estimativa dos parâmetros para o fator tempo	67
Tabela 10: Testes de verossimilhança para diferentes anos.	68
Tabela 11: Modelos categóricos por período de tempo.....	70

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Resumo dos principais fatores de risco investigados em estudos anteriores.....	20
--	----

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Contextualização	11
1.2	Questões de Pesquisa	15
1.3	Objetivos	15
1.4	Estrutura da pesquisa	16
2	REVISÃO DA LITERATURA	17
2.1	Energia do impacto, tolerância humana e resultado do acidente	17
2.2	Velocidade e outros fatores de risco para lesões em atropelamentos	19
2.3	Análise da severidade de acidentes de trânsito	26
2.3.1	Classificação dos níveis de severidade	26
2.3.2	Dados categóricos aplicados a análises de segurança viária	28
2.3.3	Modelos categóricos de resposta binária	29
2.3.4	Modelos categóricos multinomiais de resposta ordenada	31
2.3.5	Modelos categóricos multinomiais de resposta não ordenada	34
2.3.6	Instabilidade temporal na análise de dados de acidentes	37
3	MÉTODO	40
3.1	Construção de um modelo teórico e equivalência ao banco de dados disponível	40
3.2	Análise confirmatória do modelo teórico e comparação entre modelos com diferentes arranjos dos níveis de severidade	42
3.3	Avaliação do impacto dos fatores de risco sobre a severidade incorporando o aspecto da heterogeneidade não-observada	45
3.4	Avaliação do efeito dos fatores de risco ao longo dos anos	47
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
4.1	Modelo teórico	50
4.2	Análise comparativa entre modelos com diferentes arranjos dos níveis de severidade	55
4.3	Heterogeneidade não-observada	59
4.4	Análise Temporal	65
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	74
5.1	Conclusões	74
5.2	Limitações e Recomendações	77
	REFERÊNCIAS	79

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

O projeto dominante no planejamento de transporte na segunda metade do século XX levou a implementação de vias com grande capacidade e fluidez para veículos e com poucas oportunidades de travessia para pedestres. Embora essa estratégia certamente tenha permitido a consolidação do automóvel como o principal modo de viagem em países desenvolvidos, a longo prazo, esse tipo de planejamento do sistema viário mostrou-se ineficaz para gerenciar congestionamentos e teve efeitos prejudiciais na segurança do tráfego e na capacidade de locomoção das cidades (MEYER *et al.*, 2018).

De acordo com Gehl (2010), depois de anos de negligência da dimensão humana no planejamento urbano, a partir do início do século XXI, percebe-se uma urgência crescente em criar cidades para pessoas. Nos últimos anos, muitas cidades vêm buscando criar melhores condições para os pedestres e para a vida na cidade, reduzindo a prioridade que tem sido dada aos veículos motorizados. Nesse sentido, os novos desafios globais do planejamento urbano estão relacionados a uma preocupação muito mais direcionada para a dimensão humana, com enfoque na necessidade de se prover cidades vivas, sustentáveis, saudáveis e seguras.

A segurança viária é um fator essencial nesse novo contexto do planejamento urbano e trata-se de uma preocupação no âmbito global. A Organização Mundial da Saúde (OMS) estima que, todos os anos, a vida de aproximadamente 1,35 milhões de pessoas é interrompida e cerca de 50 milhões sofrem ferimentos ou ficam incapacitadas como resultado de acidentes de trânsito. Mais da metade dessas pessoas que morrem nas vias são usuários classificados como vulneráveis: pedestres, ciclistas e motociclistas (WHO, 2018). No Brasil, de acordo com dados do Sistema Único de Saúde foram registradas em torno de 33 mil mortes devido a acidentes de trânsito no ano de 2018, das quais cerca de 20% foram de pedestres (DATASUS, 2018). Essa proporção pode ser ainda maior se considerado apenas acidentes ocorridos em áreas urbanas. Na cidade de Fortaleza, por exemplo, os pedestres correspondem a cerca de 40% das vítimas fatais no trânsito (AMC, 2018).

Diante desse cenário, a Organização das Nações Unidas (ONU) decretou, em 2010, o período de 2011 a 2020 como a “Década de Ação pela Segurança no Trânsito” com o objetivo de coordenar esforços globais e convocar os países para atuarem em prol da melhoria da segurança viária. Desde então, relevantes iniciativas vêm sendo desenvolvidas por diversas

nações com o objetivo de reduzir em 50% o número de óbitos devido a acidentes de trânsito. Apesar dos avanços e das conquistas ao longo desses dez anos muitos países não conseguiram atender a suas metas, o que levou a ONU a declarar os anos de 2021 a 2030 como a “Segunda Década de Ação pela Segurança no Trânsito”.

Os princípios norteadores do Plano da Década de Ação estão presentes na abordagem dos Sistemas Seguros. Essa abordagem traz uma perspectiva mais profunda das causas por trás das fatalidades e das lesões graves no trânsito e engloba, também, o conceito de responsabilidade compartilhada, em que tanto os governos, quanto o setor privado e a sociedade compartilham a responsabilidade de um sistema de transportes seguro (EUDALY, 2019; WELLE *et al.*, 2018).

A abordagem dos Sistemas Seguros se baseia em um entendimento de que os seres humanos cometem erros e são vulneráveis a lesões em caso de um acidente. Com base neste princípio, o sistema viário deve ser projetado de modo que o erro humano não leve a um desfecho grave ou fatal. Criado na Suécia em 1997, o programa Visão Zero é uma estratégia que utiliza o conceito de Sistemas Seguros com a finalidade de extinguir fatalidades e severidades graves dos acidentes no trânsito. Os Sistemas Seguros e a Visão Zero têm como pilares, as vias, velocidades, veículos e comportamentos seguros, sendo o ponto de conexão entre esses pilares, a tolerância do corpo humano ao impacto durante um acidente (BELIN *et al.*, 2012; WELLE *et al.*, 2018; WHO, 2018).

As lesões são resultado, dentre outros fatores, da transferência de energia para o corpo humano cuja tolerância ao impacto deve-se à capacidade das diferentes partes do corpo e das suas condições físicas de resistir a essa transferência de energia com os veículos. Dentro do ambiente viário os pedestres são considerados os usuários mais vulneráveis. O fato de estarem totalmente expostos sem nenhuma barreira de proteção e terem uma massa significativamente menor em relação aos veículos motorizados, fazem com que a probabilidade de lesões mais severas nesses usuários, quando envolvidos em um acidente de trânsito, seja maior do que a nos ocupantes do veículo (SHINAR, 2017).

A gravidade das lesões tem influência de vários fatores. Devido à vulnerabilidade à lesão, a gravidade pode diferir de acordo com a idade, sendo lesões mais graves associadas principalmente a crianças e idosos (ELURU, BHAT e HENSHER, 2008; ABAY, 2013). O risco de ferimentos graves ou morte de pedestres aumenta exponencialmente com a velocidade. Ao ser atingido por um veículo a 40 km/h, um pedestre tem por volta de 35% de

probabilidade de falecer em decorrência do atropelamento. A 60 km/h, essa probabilidade aumenta para cerca de 98%, tornando quase nulas as chances de sobrevivência (ANDERSON *et al.* 1997; GARDER, 2004; ROSÉN, STIGSON e SANDER, 2011; OPAS, 2012).

Na literatura, a investigação dos fatores associados aos acidentes é realizada geralmente por meio de modelos estatísticos que tentam estabelecer uma relação entre esses fatores com a frequência ou com a gravidade da lesão, dada a ocorrência do acidente. Diversos pesquisadores vêm desenvolvendo esforços de modelagem estatística voltados à estimação do grau de severidade como variável de resposta qualitativa. De acordo com Savolainen *et al.* (2011), as variáveis dependentes dos modelos de gravidade de acidentes existentes são tipicamente um resultado de resposta binária (lesão ou não lesão) ou um resultado de resposta múltipla (lesão fatal, grave, leve ou ileso). As abordagens metodológicas tradicionais usadas incluem modelos categóricos do tipo binário (MACLEOD *et al.*, 2012; VERZOSA e MILES, 2016), multinomiais ordenados (LEE e ABDEL-ATY, 2005; KWIGIZILE, SANDO e CHIMBA, 2011) e não ordenados (AMOH-GYIMAH, SABERI e SARVI, 2017; CHEN e FAN, 2019).

Uma restrição dos modelos categóricos tradicionais, é que as estimativas de parâmetro obtidas são consideradas aplicáveis a todas as observações sem considerar a influência de fatores não observados. Isso significa que, se um parâmetro for estimado para uma determinada variável, como o sexo do pedestre, e indicar um aumento das chances de lesões mais sérias para um grupo específico como o sexo feminino, o efeito dessa variável é o mesmo para todas as mulheres. No entanto, aspectos como a saúde, a altura, o peso e a resposta do pedestre às forças de impacto são diferentes nas observações desse grupo e podem ter um efeito importante no resultado das lesões. Essa questão é tratada na literatura como um problema de heterogeneidade não observada e está associada ao fato de que muitos fatores que influenciam às lesões não estão disponíveis nos bancos de dados para análise (KIM *et al.*, 2010; MANNERING, SHANKAR e BHAT, 2016).

Existem ainda outras limitações relacionadas aos bancos de dados. Trabalhos como os de Kim *et al.* (2010), Zahabi *et al.* (2011) e Amoh-Gyimah, Saberi e Sarvi (2017), que representaram a severidade como um resultado de resposta múltipla, utilizaram dados de acidentes provenientes de registros policiais. Essas informações sobre a severidade das lesões das vítimas estão condicionadas ao julgamento do policial que atende a ocorrência. Como já evidenciado, podem existir divergências nos resultados das lesões quando comparada com a

classificação utilizada em hospitais e serviços de saúde, especialmente entre os níveis de lesões intermediárias (FERREIRA *et al.*, 2015).

É comum encontrar na literatura estudos que agregam alguns níveis de severidade, especialmente das categorias intermediárias entre ileso e fatal sob a justificativa de tentar minimizar possíveis problemas devido à classificação incorreta (CLIFTON, BURNIER e AKAR 2009; JANG *et al.*, 2013). Embora diferentes metodologias de modelagem estejam disponíveis na literatura para examinar a gravidade de acidentes relacionada a vários fatores de influência, pouco se sabe sobre como a configuração de classificação da severidade adotada pode melhorar o resultado da modelagem e o entendimento da influência desses fatores analisados.

Outro ponto pouco abordado na análise da severidade de acidentes diz respeito às mudanças ao longo do tempo trazidas por possíveis intervenções estratégicas de longo prazo. A cidade de Fortaleza, por exemplo, reduziu em aproximadamente 50% o índice de óbitos por acidentes de trânsito durante o período da década de ação pela segurança no trânsito. As ações implementadas na cidade incluem mudanças nos limites de velocidade das vias, redesenho urbano, qualificação do espaço público e campanhas de comunicação com a sociedade colocando a segurança no trânsito como prioridade. Tais mudanças podem potencialmente alterar a forma como os fatores de risco influenciam na severidade dos acidentes.

No Brasil, a avaliação dos fatores associados à severidade dos atropelamentos foi explorada de forma ainda muito incipiente. Recentemente Torres *et al.* (2017) analisaram a prevalência de fatores relacionados a severidade de usuários vulneráveis (pedestre ou ciclista), mas restrito ao entorno de escolas, na cidade de Porto Alegre. Ter uma avaliação dos fatores associados a severidade para todo o ambiente urbano da cidade ajuda aos pesquisadores e profissionais a desenvolverem contramedidas eficazes para evitar fatalidades ou reduzir a gravidade das lesões que o pedestre pode sofrer ao se envolver em um acidente de trânsito.

1.2 Questões de Pesquisa

A partir da contextualização apresentada, torna-se possível o estabelecimento das seguintes questões de pesquisa:

- a) Quais os principais fatores de risco associados à severidade de acidentes com pedestres?
- b) Qual a influência de diferentes configurações da variável resposta na modelagem da severidade?
- c) Como os níveis de severidade são afetados por esses fatores de risco quando se incorpora o aspecto da heterogeneidade não observada na modelagem?
- d) Qual a mudança do efeito desses fatores de risco na severidade das lesões ao longo “Década de Ação pela Segurança no Trânsito” em Fortaleza?

1.3 Objetivos

Essa pesquisa tem como objetivo geral efetivar uma análise confirmatória a respeito dos fatores que influenciam a severidade de atropelamentos, considerando diferentes agregações dos níveis de severidade, heterogeneidade não observada nos fatores e possíveis variações temporais durante a década de ação pela segurança no trânsito em Fortaleza. Como objetivos específicos, tem-se:

- a) Identificar e selecionar variáveis relacionadas à severidade de lesões em atropelamentos através da construção de um modelo teórico a ser confirmado, baseado na revisão da literatura.
- b) Avaliar o impacto de diferentes configurações de agregação dos níveis de lesões na qualidade do ajuste de modelos de severidade de acidentes de trânsito com pedestres por meio de modelos categóricos multinomiais.
- c) Avaliar a influência da heterogeneidade não observada na qualidade do ajuste do modelo confirmado e na inferência dos fatores de risco na severidade das lesões.
- d) Analisar a variação temporal do efeito desses fatores durante o período da “Década de Ação pela Segurança no Trânsito” para o município de Fortaleza.

1.4 Estrutura da pesquisa

Essa pesquisa de mestrado está estruturada em cinco capítulos, sendo o primeiro essa apresentação introdutória que aborda os problemas de pesquisa e objetivos. No Capítulo 2, é feita inicialmente uma revisão sobre os aspectos determinantes nas lesões em atropelamentos. Em seguida são abordados alguns conceitos, avanços e desafios relacionados às técnicas de modelagem estatística com foco na avaliação da severidade de acidentes. No Capítulo 3, são descritas as etapas do método proposto. O Capítulo 4 traz os resultados obtidos a partir da aplicação do método. Por fim, no último capítulo são apresentadas as principais conclusões deste trabalho, bem como as considerações finais acerca do seu objetivo. Ainda nesse capítulo, são listadas as sugestões para novas pesquisas relacionadas ao tema estudado.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Energia do impacto, tolerância humana e resultado do acidente

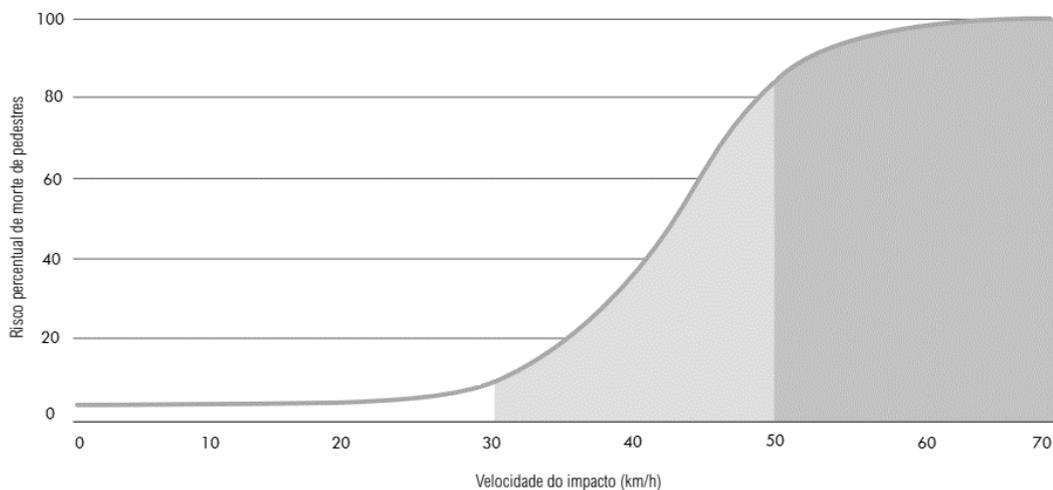
Os pedestres são comumente classificados como os “usuários mais vulneráveis” em grande parte por estarem totalmente expostos sem nenhum tipo de proteção e devido a fragilidade em casos de impacto com veículos. Mas os pedestres ainda possuem outras características críticas que os distinguem dos demais usuários, especialmente motoristas. Eles compõem um grupo muito mais heterogêneo em termos de faixa etária, de modo que sua gama de habilidades cognitivas, motoras e visuais é maior do que a dos condutores de veículos motorizados. Além disso, sua conformidade com as leis de trânsito é menos regulada e mais difícil de fiscalizar, o que os torna muito mais difíceis de proteger (SHINAR, 2017; WHELAN *et al.*, 2008).

Durante um atropelamento as lesões são resultado da transferência de energia para o corpo humano. Teorias da física, como a mecânica, aliadas à medicina, têm sido usadas para explicar a gravidade das lesões sofridas em um acidente de trânsito (SOBHANI *et al.*, 2011 YANG, 2005). A velocidade e a massa do veículo no momento do impacto determinam a quantidade de energia a ser absorvida pelo pedestre durante o atropelamento, que, a depender da quantidade, pode ter sua estrutura celular, vasos sanguíneos e outras estruturas do corpo danificadas (CORBEN *et al.*, 2004; YANG, 2005). Essa energia é expressa pelo produto entre massa e o quadrado da velocidade dividido por dois.

A massa do veículo é geralmente representada pelo tipo de veículo envolvido no atropelamento. Em relação aos automóveis de passeio, veículos maiores, como ônibus, caminhões, vans, entre outros, estão associados a uma maior probabilidade de ferimentos graves e fatais em pedestres. Pour-Rouholamin e Zhou (2016), em um estudo realizado em Illinois, apontaram que atropelamentos envolvendo ônibus aumentam em 23% as chances de lesões severas nos pedestres em comparação a um veículo de passeio. No estudo de Uddin e Ahmed (2018), caminhões estão associados a um aumento de 56% na probabilidade de lesões mais graves para o pedestre. Já as motocicletas, que tem uma massa bem inferior ao veículo de passeio, apresentaram uma redução de 53% nas chances de lesões fatais do pedestre, de acordo com o estudo de Prato *et al.* (2017). Além da massa, a rigidez e a geometria do veículo determinam, em parte, a parcela de energia a ser absorvida pelo pedestre, principalmente em relação à concentração de força no corpo humano. O uso de superfícies lisas e planas pelos projetistas de automóveis distribui as forças de impacto de forma mais favorável (CORBEN *et al.*, 2004; YANG, 2005).

Mesmo quando a velocidade não é a causa decisiva para a ocorrência de um acidente, ela está altamente relacionada à severidade das lesões, pois a velocidade do veículo no momento do impacto geralmente desempenha um papel crítico em relação à energia transferida para a vítima. A Figura 1 mostra a probabilidade de lesões fatais de pedestres para diferentes velocidades de impacto. As chances de sobrevivência ao atropelamento reduzem expressivamente com o aumento da velocidade. A 30km/h, o pedestre tem por volta de 90% de chances de sobreviver ao acidente, enquanto a 50km/h essa probabilidade reduz para cerca de 20%. É importante destacar que a curva apresentada na Figura 1 é uma função aprimorada para o risco de morte de pedestres com idade superior a 15 anos, com base em dados de acidentes da Alemanha envolvendo apenas veículos de passeio.

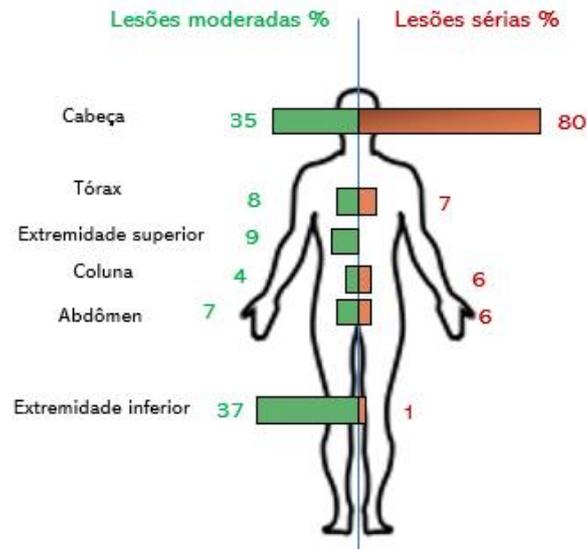
Figura 1: Risco de morte de pedestres em função da velocidade de impacto com o veículo.



Fonte: Adaptado de WELLE (2015)

A tolerância do pedestre ao impacto está relacionada à vulnerabilidade das diferentes partes do corpo humano e suas diferentes condições físicas de resistir à troca de energia com o veículo. Considerando que as trajetórias de veículos e pedestres geralmente se cruzam em ângulo reto, a maioria dos atropelamentos envolve impactos com a parte frontal dos veículos. A Figura 2 apresenta a distribuição das lesões nas diferentes partes do corpo. A maioria das lesões sérias está relacionada a impactos na cabeça. De acordo com Crandall, Bhalla e Madeley (2002), em pedestres adultos, a cabeça e os membros inferiores são as partes do corpo mais lesionadas, sendo o traumatismo craniano a principal causa de mortalidade.

Figura 2: Distribuição das lesões em atropelamentos.



Fonte: Adaptado de Crandall, Bhalla e Madeley (2002)

Das características do pedestre, a idade desses usuários é sempre um dos fatores mais notáveis. Os pesquisadores têm observado que os pedestres mais velhos (com idade superior a 65 anos, pelo menos) estão associados a um risco maior de lesões graves ou fatais, quando envolvidos em um acidente de trânsito. Uddin e Ahmed (2018), em um estudo realizado em Ohio, apontaram que pedestres com idade acima de 65 anos têm cerca de 43% a mais de chances de sofrerem lesões mais severas em um acidente de trânsito. Resultados parecidos são encontrados nos trabalhos de Aziz, Ukkusuri e Hasan (2013), Chen e Fan (2019), Eluru, Bhat e Hensher (2008), Jang *et al.* (2013) e Lee e Abdel-Aty (2005). Esses autores apontam principalmente a fragilidade ao impacto com os veículos e a maior debilidade da saúde desse grupo como explicação para esses resultados.

Pedestres muitos jovens como as crianças também compõem um grupo cujas características os tornam mais suscetíveis a lesões graves. Alguns autores apontam além da fragilidade em relação ao impacto a altura desses pedestres como aspectos que os tornam mais vulneráveis as lesões (JANG *et al.*, 2013; WHELAN *et al.*, 2008; ZEEDYK e KELLY, 2003).

2.2 Velocidade e outros fatores de risco para lesões em atropelamentos

Tradicionalmente, os usuários do sistema de transporte eram considerados responsáveis pelos acidentes. Durante as décadas de 1950 e 1960, as estratégias de prevenção contra acidentes foram direcionadas para melhorar o comportamento dos usuários das vias,

principalmente por meio de estratégias de educação, informação e fiscalização. Com o tempo essas estratégias progrediram para abordagens mais abrangentes que incluíam intervenções nos veículos, vias e serviços de emergência ou atendimento pós-acidente. Essa mudança de perspectiva foi fortemente influenciada pela Matriz de Haddon (OECD, 2008; TIWARI e MOHAN, 2016).

Haddon (1968), desenvolveu uma estrutura sistemática para segurança no trânsito, baseada em duas dimensões (Tabela 1). A primeira dimensão tem como ponto de partida o fato de que todos os resultados sociais indesejáveis de um acidente são precedidos por processos que se dividem naturalmente em três estágios: pré-acidente, acidente e pós-acidente. A segunda dimensão é dividida nos fatores “humano”, “veículo” e “ambiente”. Além de atuar como ferramenta de planejamento para identificação de fatores que operam nas diferentes fases e dimensões do acidente, a matriz de Haddon pode ser útil ainda na concepção de modelos que possam ajudar a considerar de forma mais abrangente fatores importantes no resultado das lesões em acidentes de trânsito.

Tabela 1: Matriz de Haddon para entender os fatores de lesão em acidentes de trânsito

<i>Fase</i>	<i>Fatores</i>		
	Humano <i>(comportamento do usuário)</i>	Veículo	Meio Ambiente <i>(Via e ambiente rodoviário)</i>
Pré-acidente <i>(prevenção de acidentes)</i>	Atitude Informação Execução	Manipulação Gerenciamento de velocidade Frenagem Prevenção de colisão Sistemas eletrônicos de estabilidade	Projeto e layout de vias Limites de velocidade Transporte inteligente Clima Instalações para pedestres
Acidente <i>(prevenção de lesões durante a colisão)</i>	Uso de restrições Velocidade de impacto Imparidade	Proteção contra impacto da carcaça do veículo Restrições Recursos de segurança, por exemplo airbags	Objetos de beira de via que absorvem energia cinética
Pós-acidente <i>(sustentando a vida)</i>	Acesso a cuidados médicos Saúde geral do usuário da via	Sistema de notificação automática de acidentes Acesso ao local do acidente Risco de incêndio	Serviços de resgate Tempo decorrido para atendimento médico adequado

Fonte: Adaptado de OECD (2008)

A nova abordagem de segurança viária, denominada Sistemas Seguros, discute os fatores de risco e medidas relacionadas aos usuários da via, aos veículos e ao ambiente viário de forma integrada. Ela reconhece que o transporte é importante para a sociedade, mas

ressalta que a viagem deve ser segura para todos os usuários da via, pois eles interagem com as vias e veículos de modo a facilitar seu movimento (OPAS, 2013).

O objetivo dessa abordagem consiste na eliminação de acidentes graves e fatais através do fornecimento de um sistema de transporte seguro, que é complacente com o erro humano e que leva em conta a vulnerabilidade das pessoas a ferimentos graves. Em vez de atribuir a responsabilidade do acidente ao comportamento e às escolhas individuais, a abordagem do Sistema Seguro se baseia no princípio de que os erros são inevitáveis, mas as mortes e lesões graves no trânsito não deveria ser. Dessa forma, o sistema viário deveria ser projetado de tal maneira que o erro humano não resulte em um desfecho grave ou fatal (EUDALY, 2019; WELLE *et al.*, 2018, OECD, 2008). A Figura 3 apresenta as dimensões abordadas no Sistemas Seguros, de modo que as ações implementadas com foco na interação entre essas dimensões se complementam para reduzir as fatalidades e lesões graves em acidentes de trânsito.

Figura 3: Dimensões dos Sistemas Seguros



Fonte: Pan-Americana da Saúde (2018), traduzido de *Department of Transport and Main Roads*, Queensland (2015).

O ponto de conexão entre as dimensões da abordagem do Sistema Seguro é a tolerância humana aos impactos do acidente, ou seja, até que ponto a interação entre os veículos, as vias e humanos em qualquer acidente resulta em forças cinéticas que vão além da capacidade do corpo humano de suportar o impacto. No caso de um atropelamento, a chave

para isso são velocidades mais seguras, ou seja, as velocidades desempenhadas pelos veículos devem ser adequadas para minimizar o impacto com o pedestre.

Existe um impasse entre a escolha da velocidade desejada pelos condutores que pode ser percebida como um recurso para reduzir os tempos de viagem, mas que tem também consequências negativas que envolvem velocidades excessivas (ou seja, altas velocidades que estão acima do limite do permitido) e velocidades inadequadas (incompatíveis com as condições existentes, mas dentro dos limites). A velocidade que os motoristas escolhem para viajar é o resultado de um processo complexo que envolve as características e circunstâncias pessoais, bem como o tipo de via, seu traçado e arredores, a quantidade e composição do tráfego, condições ambientais predominantes, entre outros aspectos. A Tabela 2 apresenta alguns exemplos desses fatores que afetam a escolha da velocidade.

Tabela 2: Exemplos de fatores que afetam a escolha de velocidade dos condutores

Relacionado às vias e veículos	Relacionado ao trânsito e ao meio ambiente	Relacionado ao motorista
<i>Via</i>	<i>Tráfego</i>	
Largura Inclinação Alinhamento Sinalização Qualidade do pavimento	Densidade Composição Velocidade predominante	Idade Sexo Tempo de reação Atitudes Aceitação de risco Percepção de perigo Nível de álcool Propriedade do veículo Circunstâncias de viagem Ocupação do veículo
<i>Veículo</i>	<i>Meio Ambiente</i>	
Tipo Relação potência / peso Velocidade máxima Conforto	Clima Condição de superfície Luz natural Iluminação viária Limite de velocidade Fiscalização	

Fonte: WHO (2004)

Vários desses aspectos são investigados como fatores de risco por influenciarem as velocidades atingidas pelos condutores e terem um efeito indireto nos resultados das lesões nos pedestres. Alguns estudos tentaram estabelecer uma relação entre as características dos condutores envolvidos no acidente e o nível de severidade das lesões sofridas pelos pedestres. Pour-Rouholamin e Zhou (2016) apontaram que motoristas mais jovens (com idade até 24 anos), tem cerca de 14% a mais de chances de se envolverem em acidentes que resultam em ferimentos graves nos pedestres, em relação a adultos com idade de 25 a 60 anos. Condutores com idade superior a 60 anos, estão associados a uma redução de 15,4% na probabilidade de

lesões mais graves. Kim *et al.* (2008) obtiveram resultados semelhantes em um estudo realizado na Carolina do Norte - EUA. Em ambos os trabalhos os autores apontam como possível razão para essa relação, que à medida que os condutores envelhecem, eles tendem a seguir comportamentos de direção mais cautelosos e conservadores, passando a dirigir em velocidades mais seguras. Parte desse comportamento pode estar relacionado à experiência, mas também à capacidade visual reduzida, que pode induzir os condutores a dirigirem em velocidades mais baixas para compensar esse problema.

Eluru, Bhat e Hensher (2008) observaram ainda que motoristas do sexo masculino estão associados a maiores probabilidades de estarem envolvidos em acidentes com lesões mais severas nos pedestres. Kim *et al.* (2008) apontam que em média os condutores homens têm cerca de 33,3% mais chances de se envolverem em acidentes com lesões fatais para os pedestres. Esses resultados podem ter uma relação com um maior comportamento de risco, para assumir maiores velocidades, desse grupo de condutores em comparação com condutores do sexo feminino.

O desenho viário tem um efeito crucial sobre como as pessoas usam e se comportam nas vias. Na perspectiva dos Sistemas Seguros quando as ruas são projetadas e implementadas para proporcionar segurança, elas induzem a condução dos veículos a velocidades adequadas. Além disso, um desenho mais “tolerante”, ou seja, que diminui a ocorrência de erros e os impactos desses erros quando eles ocorrem, pode reduzir a probabilidade de lesões mais sérias (WELLE *et al.*, 2018).

Vias de classificação funcional mais alta como vias expressas ou arteriais, caracterizadas por possuírem faixas de rolamento mais largas e em maior número, o que possibilita velocidades maiores por parte dos veículos motorizados, estão associadas a acidentes com lesões mais severas do pedestre. A classificação viária determina os limites máximos de velocidade permitido nas vias e por isso é uma variável comumente investigada por refletir de certa forma as velocidades atingidas pelos condutores (ZAHABI *et al.*, 2011; LI *et al.*, 2017).

Alguns estudos têm um foco em características específicas da via, como o número de faixas. Os resultados encontrados no trabalho de Pour-Rouholamin e Zhou (2016) mostraram que acidentes ocorridos em vias com mais de duas faixas tem em média 22,3% a mais de chances de resultarem em lesões graves ou fatais nos pedestres. Pascua (2019) considera esses resultados apropriados, uma vez que vias com várias faixas são indicadas para

proporcionar maior mobilidade para os veículos motorizados e possibilitam maiores velocidades e maior fluxo de veículos, aumentando a exposição do pedestre e tornando as travessias mais arriscadas.

Pour-Rouholamin e Zhou (2016) apontaram que vias divididas com canteiro central ou separadas por demarcações têm em média 21,5% e 10,6%, respectivamente, de chances a mais de resultarem em atropelamentos com lesões mais severas nos pedestres em relação a vias sem separação. A hipótese levantada pelos autores é de que embora os canteiros forneçam um refúgio para os pedestres ao cruzarem a via, essas instalações são geralmente consideradas para vias com limites de velocidade mais alta, que, conseqüentemente, pioram o resultado das lesões quando o pedestre está envolvido no acidente. Por outro lado, Amoh-Gyimah, Saberi e Sarvi (2017), em um estudo realizado em Gana, apontaram que vias com pistas separadas estão associadas a um risco menor de lesões graves do pedestre, o que é atribuído a possibilidade de refúgio do pedestre durante a travessia, embora os autores não façam distinção quanto ao tipo de separação.

Estudos demonstraram que locais com algum tipo de dispositivo de controle de tráfego como semáforos, estão associados a riscos menores de lesões severas em pedestres quando comparados a locais sem controle de tráfego. Kim *et al.* (2010) apontam uma redução de cerca de 34% na probabilidade de lesões fatais no pedestre em locais com dispositivo de controle de tráfego em relação a locais sem dispositivos. Aziz, Ukkusuri e Hasan (2013) e Sze e Wong (2007) obtiveram resultados semelhantes em seus trabalhos. Os autores atribuem esses resultados a melhor indicação de prioridade em locais com controle de tráfego o que leva a uma maior cautela tanto dos condutores quanto dos pedestres.

Fatores relacionados ao meio ambiente que incluem condições climáticas e de visibilidade são também investigados devido a influência nas velocidades desempenhadas. Alguns pesquisadores atribuíram uma maior probabilidade de lesões graves de pedestres às condições adversas, como dias de chuva ou neve (AMOH-GYIMAH, SABERI e SARVI, 2017; LEE e ABDEL-ATY, 2005). Entretanto, outros estudos sugerem que essas condições diminuem as chances de ferimentos graves ou fatais devido a uma maior cautela dos condutores quando dirigem nessas condições (KIM *et al.*, 2008; AZIZ, UKKUSURI e HASAN, 2013; CHEN e FAN, 2019).

O horário de ocorrência dos acidentes também apresenta uma relação significativa com o resultado das lesões. Os resultados encontrados por Uddin e Ahmed (2018) sugeriram

que os acidentes ocorridos fora do horário de pico (entre 10h e 16h) têm cerca 23% de chances a menos de resultarem em lesões mais sérias nos pedestres. Resultado semelhante pode ser encontrado no trabalho de Kim *et al.* (2008). Isso pode ser devido ao menor tráfego durante o horário de pico e, conseqüentemente, menor chance de se envolver em acidentes em geral.

Em relação às condições de iluminação do dia, atropelamentos ocorridos entre 20h e às 6h apresentam uma probabilidade maior de lesões graves (8,4%), de acordo com o trabalho de Pour-Rouholamin e Zhou (2016). Jang *et al.*, (2013) encontraram resultados semelhantes para acidentes ocorridos entre 00h às 6h, em um estudo realizado em São Francisco – EUA.

O período da semana também tem influência sobre os resultados das lesões. Uddin e Ahmed (2018) descobriram que acidentes ocorridos durante os finais de semana aumentam a probabilidade de lesões graves em 28,4% e reduzem a probabilidade de lesões leves em 17,5% em relação à acidentes ocorridos em dias úteis. Normalmente, nos finais de semana, o volume do tráfego é menor do que durante a semana, o que, por sua vez, resulta em maiores velocidades de deslocamento. Além disso, os condutores podem ainda estarem sobre o efeito de substâncias como o álcool. Conseqüentemente, o risco de um pedestre se envolver em um impacto com um veículo em alta velocidade aumenta.

Fatores relacionados às características de uso do solo nas proximidades do acidente também foram investigados. Os resultados do trabalho de Prato *et al.* (2017) indicam que áreas comerciais, áreas residenciais e áreas industriais reduzem as chances de lesões mais severas nos pedestres em 26,4%, 25,3% e 12,4%, respectivamente em relação a áreas com muitos edifícios. Além disso, vias de baixa velocidade e alta densidade de tráfego estão positivamente relacionadas a uma redução na gravidade das lesões em pedestres. Os autores apontam que essas áreas tem em comum uma presença maior de pedestres, que tendem a tornar os condutores mais conscientes e atentos.

Apesar da grande quantidade de trabalhos com foco na avaliação da influência de fatores de risco na severidade, é raro encontrar na literatura um modelo teórico que ilustra graficamente as relações de interesse que se queira investigar. Sekaran e Bougie (2016), define uma estrutura teórica como um modelo conceitual de como alguém teoriza ou dá sentido lógico às relações entre vários fatores que foram identificados como importantes para o problema. A proposição de uma estrutura como essa, sustentada por evidências de

pesquisas/práticas e com foco na vulnerabilidade do corpo humano ao impacto com os veículos, aproxima esses estudos sobre a severidade de acidentes de trânsito de uma perspectiva mais atual do foco da segurança viária, baseada na abordagem dos Sistemas Seguros. Esse modelo teórico, quando confirmado, pode ser útil para pesquisadores e formuladores de políticas de segurança no trânsito identificarem e mensurarem o efeito de fatores de risco nas lesões em acidentes de trânsito.

O Quadro 1 resume alguns dos principais fatores de risco investigados em estudos anteriores.

Quadro 1: Resumo dos principais fatores de risco investigados em estudos anteriores

Fator de risco	Referência
Gênero do Pedestre	Eluru, Bhat e Hensher (2008); Uddin e Ahmed (2018); Chen e Fan (2019)
Idade do pedestre	Eluru, Bhat e Hensher (2008); Dong et al. (2019); Batouli et al. (2020)
Gênero do condutor	Kim et al. (2008); Uddin e Ahmed (2018); Chen e Fan (2019)
Idade do condutor	Kim et al. (2008); Kim et al. (2010); Tay et al. (2011)
Classificação viária	Zahabi et al. (2011); Li et al. (2017)
Número de faixas	Verzosa e Miles (2016); Pour-Rouholamin e Zhou (2016)
Canteiro Central	Pour-Rouholamin e Zhou (2016); Amoh-Gyimah, Saberi e Sarvi (2017)
Dispositivo de controle de tráfego	Rothman et al. (2012); Aziz, Ukkusuri e Hasan (2013); Pour-Rouholamin e Zhou (2016)
Condições climáticas	Pour-Rouholamin e Zhou (2016); Amoh-Gyimah, Saberi e Sarvi (2017)
Tipo de veículo	Kim et al. (2008); Uddin e Ahmed (2018); Batouli et al. (2020)
Hora do dia	Kwigizile, Sando e Chimba (2011); Verzosa e Miles (2016)
Dia da Semana	Jang et al. (2013); Uddin e Ahmed (2018)
Uso do solo	Abay (2013); Aziz, Ukkusuri e Hasan (2013); Prato et al. (2017)
Localização do acidente	Kwigizile, Sando e Chimba (2011); Abay (2013); Zafri et al. (2020)

2.3 Análise da severidade de acidentes de trânsito

2.3.1 Classificação dos níveis de severidade

Existem diversas formas de representar os níveis de severidade de lesões relacionadas aos acidentes de trânsito. Uma das classificações mais conhecidas é a classificação KABCO, desenvolvida pelo Conselho Nacional de Segurança (*National Safety Council* – NSC) nos Estados Unidos e aplicada por policiais nos relatórios de acidentes. Vale destacar que em muitos países, a polícia é obrigada a comparecer ao local de um acidente em que haja pelo menos uma pessoa ferida e um veículo envolvido e são responsáveis por coletar informações sobre o acidente e avaliar a gravidade dos ferimentos. Essas informações relatadas pela polícia raramente são verificadas posteriormente com os registros médicos, exceto quando a vítima morre no hospital. Nesses casos, o hospital notifica a polícia sobre a

morte, que pode modificar seu relatório, de modo que um acidente com vítima ferida se torna um acidente com vítima fatal (BURDET *et al.*, 2015).

Na classificação KABCO a letra K denota uma “lesão fatal”. Geralmente, os relatórios consideram ainda um período de contagem de pelo menos trinta dias para atualização de fatalidades no trânsito. A letra A denota uma “lesão incapacitante”, que seria qualquer lesão, exceto a fatalidade, que impede a pessoa ferida de andar, dirigir ou continuar suas atividades normalmente. A letra B refere-se a uma “lesão evidente não incapacitante”, para indicar qualquer lesão evidente para os observadores na cena do acidente, exceto uma lesão fatal ou incapacitante. A letra C indica uma possível lesão, que pode ser relatada pela vítima, mas que não é nenhuma dos outros três níveis. Por fim, a letra O denota “nenhuma lesão aparente” e é utilizada quando não há evidência física de lesão e a vítima não relata qualquer alteração nas funções normais (HAUER, 2006). Apesar da definição de alguns critérios para cada nível, essa classificação pode estar condicionada à avaliação do policial que provavelmente não tem um histórico de formação na área da saúde (BENAVENTE *et al.* 2006).

Em oposição à classificação das lesões realizadas pelos policiais, um outro padrão de classificação aceito internacionalmente para medir a severidade das lesões em acidentes de trânsito é a Escala Abreviada de Lesões (*Abbreviated Injury Scale – AIS*). A AIS foi desenvolvida pela *Association for the Advancement of Automotive Medicine* para fornecer aos pesquisadores um método numérico simples para classificar e comparar lesões por gravidade e para padronizar a terminologia usada para descrever lesões. Os níveis de severidade variam em uma escala de 0 (sem lesão) a 6 (sem sobrevivência) e são determinados para nove regiões diferentes do corpo. A pontuação máxima (MAIS) entre a pontuação AIS codificada para cada região do corpo é frequentemente utilizada com uma medida agregada da gravidade da lesão. Apesar dessa classificação mais realista baseada em critérios médicos, em muitos países, as estatísticas oficiais sobre a severidades das lesões provenientes de acidentes de trânsito baseiam-se apenas na avaliação do policial ou do agente de trânsito no local do acidente ou em informações repassadas à esses agentes pouco tempo após o acidente, com exceção dos casos de fatalidades (*WORKING GROUP ON SERIOUS ROAD TRAFFIC CASUALTIES*, 2010).

Alguns estudos têm investigado inconsistências entre a classificação adotada pelos agentes policiais e a classificação utilizada por profissionais da saúde. Tsui *et al.* (2010)

descobriu que apenas 5% dos ferimentos relatados como graves pelos policiais de Hong Kong foram considerados graves no hospital. Ferreira *et al.* (2015), comparou a classificação policial da severidade dos acidentes com a classificação MAIS utilizada em hospitais nas cidades de Porto e Vila Nova de Gaia, em Portugal. Os autores observaram uma tendência dos agentes policiais de superestimar a gravidade das lesões. Uma proporção notável dos ferimentos graves relatados pela polícia são, na realidade, ferimentos leves. Inconsistências nessas classificações adotadas podem gerar algum viés nos resultados de pesquisas que investigam fatores de risco relacionados a níveis específicos de severidade.

Alguns estudos que investigam a severidade das lesões de acidentes de trânsito e utilizam informações dos registros de acidentes provenientes de relatórios policiais optam por agregar alguns níveis da classificação, especialmente os níveis intermediários que tem uma proximidade em termos de consequência do acidente (ABAY, 2013; POUR-ROUHOLAMIN e ZHOU, 2016; UDDIN e AHMED, 2018). Clifton, Burnier e Akar (2009), por exemplo, usando dados da cidade de Baltimore (EUA) que aplica a classificação KABCO, reagruparam as cinco categorias em três níveis: ileso (nenhuma lesão aparente e possível lesão), lesão (lesão evidente e lesão incapacitante) e fatalidade. Abay (2013), investigando acidentes envolvendo pedestres e um único veículo motorizado na cidade de Danish (Dinamarca), reagrupou as quatro categorias originais do banco de dados em apenas três.

Em geral, a maioria desses estudos justifica a agregação dos níveis de gravidade devido ao número muito baixo de observações em uma determinada categoria. Os autores afirmam que o agrupamento das categorias visa melhorar os resultados dos modelos e acreditam que a fusão dos níveis de gravidade das lesões adjacentes não afeta substancialmente as inferências, desde que essas categorias de lesões adjacentes também sejam ligeiramente semelhantes. No entanto, não deixam claro em que aspectos esses modelos poderiam ser aprimorados, nem apresentam um estudo comparativo entre modelos com níveis desagregados.

2.3.2 Dados categóricos aplicados a análises de segurança viária

Dados em escala discreta ou categórica geralmente desempenham um papel importante na área de transportes, porque muitas análises sobre políticas para essa área lidam com esses dados. A escolha do modo de viagem (automóvel, ônibus, bicicleta, etc.), a severidade de um acidente (ileso, ferido, fatal), o comportamento de um usuário do sistema, são alguns exemplos de dados discretos presentes nas análises de transportes. De uma

perspectiva conceitual, esses dados são classificados como aqueles que envolvem uma escolha comportamental ou simplesmente descrevem resultados discretos de um evento físico (WASHINGTON, KARLAFTIS e MANNERING, 2003).

Uma forma de avaliar dados categóricos é através de tabelas de contingência. As tabelas de contingência podem ser úteis para determinar se duas variáveis qualitativas, como o nível de severidade da lesão e o tipo de veículo envolvido no acidente, apresentam alguma associação. Al-Ghamdi (2002) investigou acidentes envolvendo pedestres na capital da Arábia Saudita com o auxílio de tabelas de contingência. O estudo tinha como objetivo analisar os atropelamentos em relação as causas, características e localização da lesão no corpo da vítima. O autor conduziu ainda uma análise de associação entre a severidade dos atropelamentos e algumas das variáveis do estudo por meio de testes qui-quadrado.

Salon e McIntyre (2018) também utilizaram testes qui-quadrado em tabelas de contingência para verificar relações entre fatores de risco e a severidade de atropelamento de pedestre e ciclistas em São Francisco, EUA. Porém, seu estudo se estendeu a uma análise multivariada por meios de modelos categóricos.

Situações mais complexas como a análise da relação simultânea entre várias variáveis explicativas e uma variável dependente categórica exigem a aplicação de outras abordagens. Os modelos categóricos são uma boa alternativa para essas análises. A forma estrutural do modelo descreve os padrões de associação e interação entre as variáveis explicativas e dependente. Além disso, os valores previstos do modelo suavizam os dados e fornecem melhores estimativas da média da variável dependente em função de variáveis explicativas (AGRESTI, 2006). Modelos de regressão binários, multinomiais ordenados e não ordenados são as três principais técnicas estatísticas que têm sido amplamente utilizadas. Nas próximas seções serão detalhados alguns aspectos sobre cada uma dessas abordagens e suas aplicações em segurança viária.

2.3.3 Modelos categóricos de resposta binária

O modelo categórico mais simples consiste num modelo em que a variável resposta tem apenas duas categorias, geralmente codificadas como 1 para ocorrência de um evento de interesse e 0 para não ocorrência. Assim como na regressão linear tradicional, o objetivo de uma análise com aplicação de modelos categóricos é estimar um modelo com o melhor ajuste e o mais parcimonioso possível. Ao formular um modelo é comum iniciar com uma função linear de variáveis independentes que influenciam na variável resposta. Contudo,

quando a variável resposta é categórica essa relação linear não é adequada, dado que algumas premissas básicas de um modelo de regressão linear podem ser violadas, como a homocedasticidade e a normalidade dos resíduos (LONG, 1997).

Dessa forma, muitas funções foram propostas para o uso na análise de uma variável resposta binária (LONG, 1997; HOSMER, LEMESHOW e STURDIVANT, 2013). Uma das mais usuais é a transformação da função logística conhecida também como transformação logit, descrita na Equação 1:

$$g(x) = \ln \left[\frac{\pi(x)}{1-\pi(x)} \right] = \beta_0 + \beta_1 X + \dots + \beta_j X \quad (1)$$

Onde, $\pi(x)$ representa o valor da média condicional da variável resposta, X indica um conjunto de variáveis independentes e os valores de β indicam os parâmetros do modelo. É importante destacar que a média de uma variável binária representa a frequência relativa da ocorrência do evento de interesse (KING e ZENG, 2001). A aplicação da transformação logit dá origem ao modelo de regressão logística ou modelo logit expresso na forma:

$$\pi(x) = \frac{e^{\beta_0 + \beta_1 X + \dots + \beta_j X}}{1 + e^{\beta_0 + \beta_1 X + \dots + \beta_j X}} \quad (2)$$

A importância dessa transformação é que $g(x)$ possui muitas das propriedades desejáveis de um modelo de regressão linear. O logit, $g(x)$, é linear em seus parâmetros, pode ser contínuo e pode variar de menos infinito a mais infinito, dependendo do intervalo de x (HOSMER, LEMESHOW e STURDIVANT, 2013). Vale destacar que a função logit não é a única função de ligação que pode ser usada em $g(x)$. Outras transformações tais como a probit e a log-log complementar podem ser aplicadas.

Em relação aos preditores, as variáveis podem ser tanto categóricas quanto medidas quantitativas. O método de máxima verossimilhança é empregado para a estimação dos parâmetros, construindo a função de verossimilhança a seguir:

$$l(\beta) = \prod_{i=1}^n \pi(X_i)^{y_i} (1 - \pi(X_i))^{1-y_i} \quad (3)$$

onde, y_i denota o i -ésimo resultado observado, com o valor de 0 ou 1 e n corresponde ao número de observações. A melhor estimativa de β pode ser obtida maximizando a expressão do logaritmo da verossimilhança:

$$LL(\beta) = \ln(l(\beta)) = \sum_{i=1}^n \{y_i \ln(\pi(X_i)) + (1 - y_i) \ln(1 - \pi(X_i))\} \quad (4)$$

A interpretação dos parâmetros não é tão simples de analisar como nos modelos de regressão linear. Existe uma relação positiva entre o sinal do coeficiente e a direção do efeito nas probabilidades previstas, ou seja, um coeficiente positivo representa um aumento na probabilidade do evento de interesse e um coeficiente negativo representa uma diminuição nessa probabilidade, mas a relação não é direta como na regressão linear. Uma alternativa para mensurar o efeito de uma variável explicativa consiste no cálculo da razão de chances (*Odds-Ratio*), que representa quantas vezes é mais provável um grupo pertencer a uma determinada categoria da variável resposta do que outro. Matematicamente, ela é expressa pela exponencial do parâmetro estimado.

A aplicação dessa abordagem na análise da severidade de acidentes é bastante usual, uma vez que as lesões podem facilmente ser um resultado de resposta binária tais como lesões em oposição a acidentes sem ferimentos ou acidentes fatais contra acidentes não-fatais. Alguns estudos adotaram esse tipo de modelo para analisar a associação entre a severidade e fatores contribuintes. Chen, Cao e Logan (2012), por exemplo, utilizaram um modelo binário logit para examinar diferentes fatores que afetam a gravidade de acidentes em interseções. O estudo utilizou um banco de dados de acidentes de 10 anos da cidade de Victoria, na Austrália, que classificava as lesões em fatais e não fatais. Ma *et al.* (2009), por outro lado, dividiram a variável resposta nas categorias acidentes graves ou fatais e acidentes leves ou de menores gravidades. Os autores aplicaram esse modelo de regressão logística na avaliação dos fatores de risco associados a severidade dos acidentes em uma cidade chinesa.

2.3.4 Modelos categóricos multinomiais de resposta ordenada

Quando a variável dependente possui mais de duas categorias um modelo categórico de resposta múltipla é utilizado. Esses modelos podem ser de dois tipos: modelos ordenados, que consideram uma ordem das categorias de resposta, ou modelos não ordenados que ignoram essa ordem. Os níveis de severidade das lesões são naturalmente ordenados e por isso para mensurar a relação entre os fatores de risco e a severidade de lesões em acidentes de trânsito, os modelos categóricos ordenados são comumente empregados.

No modelo ordenado, uma variável latente y^* é usada como base para a modelagem da classificação ordinal dos dados. Essa variável não observada é especificada como uma função linear para cada observação de acidente e é expressa por $y^* = \beta X + \varepsilon$, onde X é um vetor de variáveis que determinam a ordem discreta de cada observação, β é um vetor de parâmetros estimados e ε é um termo de erro responsável por efeitos não observados

(WASHINGTON, KARLAFTIS e MANNERING, 2003). Com a variável y^* estimada, os dados observados das lesões ordinais são definidos como:

$$\begin{aligned}
 y &= 0 \text{ se } y^* < \mu_0 \\
 y &= 1 \text{ se } \mu_0 < y^* < \mu_1 \\
 y &= 2 \text{ se } \mu_1 < y^* < \mu_2 \\
 y &= i \text{ se } y^* > \mu_{i-1}
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

onde, μ_i são parâmetros de limites estimados que definem y , que por sua vez corresponde a codificação da ordenação da severidade, e i representa o nível mais alto das categorias da variável resposta. Os parâmetros μ_i são estimados juntamente com os parâmetros β do modelo através do método de verossimilhança. As probabilidades associadas aos resultados ordinais de um modelo ordenado são calculadas como:

$$\begin{aligned}
 P(y = 0|x) &= F(\mu_0 - \beta'x) \\
 P(y = 1|x) &= F(\mu_1 - \beta'x) - F(\mu_0 - \beta'x) \\
 P(y = 2|x) &= F(\mu_2 - \beta'x) - F(\mu_1 - \beta'x) \\
 P(y = i|x) &= F(\mu_i - \beta'x) - F(\mu_{i-1} - \beta'x)
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

em que μ_i e μ_{i-1} representam os limites superior e inferior para a gravidade da lesão i e $F(*)$ pode assumir a função de distribuição logística do termo de erro aleatório ε_i estimado em x para o caso de um modelo logit ou a função de distribuição cumulativa normal padrão para o caso de um modelo probit.

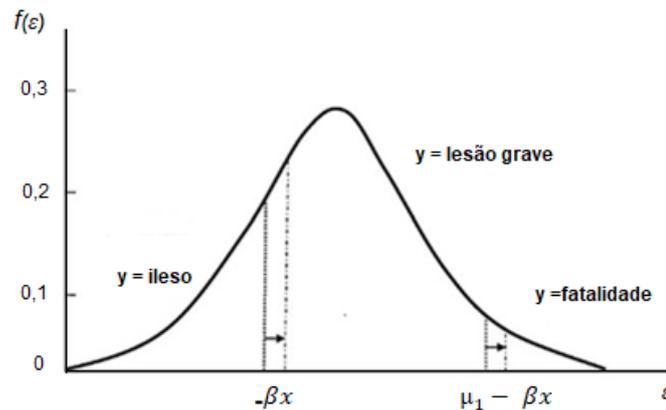
O sinal do coeficiente estimado de uma variável explicativa pode indicar diretamente a direção do efeito da variável na probabilidade dos níveis mais altos e mais baixos de gravidade da lesão. No caso de modelos com mais de dois níveis da variável resposta uma alternativa para compreender melhor o efeito de um fator de risco sobre a severidade é calcular os efeitos marginais, que representam a mudança na probabilidade de que um determinado resultado ocorra quando o fator de risco muda em 1 unidade, mantendo todas as outras variáveis constantes.

Jang *et al.* (2013) analisaram acidentes envolvendo pedestres na cidade de São Francisco com foco em dois aspectos: ocorrência e gravidade. Para análise das lesões, um modelo probit ordenado foi especificado para avaliar os fatores de risco que aumentaram a probabilidade de lesões graves e fatais. Zahabi *et al.* (2011) avaliaram fatores de risco

associados a severidade de acidentes com pedestres e ciclistas na cidade de Montreal e utilizaram um modelo logit ordenado. Esses autores, no entanto, sugerem a utilização de outras técnicas de modelagem em trabalhos futuros para validar os resultados encontrados, como consequência de algumas limitações que esses modelos tradicionais podem apresentar.

De acordo com Abay (2013) e Mannering e Bhat (2014) existem pelo menos duas limitações potencialmente associadas aos modelos ordenados tradicionais. A primeira diz respeito à restrição de monotonicidade que os modelos ordenados impõem aos dados, que orienta a forma como as variáveis independentes do modelo afetam os resultados de probabilidade sucessivos. Essa restrição faz com que a mudança de limiares de probabilidade, dados pelos pontos de corte μ , ocorra sempre na mesma direção, como observado na Figura 4.

Figura 4: Ilustração da limitação do modelo ordenado padrão aplicado à gravidade da lesão por acidente



Fonte: Adaptado de Washington, Karlaftis e Mannering (2003)

Essa condição é referida na literatura como *odds proporcionais* ou premissa de regressão paralela. Essa condição poderia afetar as inferências sobre as variáveis e as implicações políticas extraídas da análise, uma vez que algumas variáveis podem não satisfazer essa premissa. Um exemplo simples é o efeito da “idade” na probabilidade de ocorrência de diferentes níveis de severidade do acidente. Sob essa suposição um aumento na idade deve sempre resultar em um aumento (ou diminuição) na probabilidade de acidentes de alta gravidade. No entanto, sabe-se que a probabilidade de ocorrência de acidentes de alta gravidade é alta para pedestres idosos e crianças, o que contradiz a suposição de *odds proporcionais*.

A segunda limitação, que também é uma limitação dos modelos não ordenados tradicionais, é que esses modelos têm geralmente sido construídos sob a suposição de que os

efeitos das variáveis explicativas consideradas não variam entre as observações, o que não é necessariamente verdade. Muitos dos fatores que afetam a probabilidade de um acidente ou a lesão resultante possivelmente não estarão disponíveis para o analista. Esses fatores podem introduzir variação no impacto do efeito das variáveis observadas nos níveis de severidade. Por exemplo, o gênero do pedestre pode ser um fator significativo na severidade da lesão durante o acidente, considerando que existem diferenças fisiológicas claras entre homens e mulheres. Contudo há também grande variação entre pessoas do mesmo sexo, incluindo peso, altura, tempo de reação entre outros aspectos, que não estão disponíveis nos bancos de dados, mas que pode influenciar nos resultados das lesões.

A literatura trata esse aspecto como um problema de heterogeneidade não-observada. Se a heterogeneidade não observada for ignorada, e os efeitos das variáveis observáveis forem restritos a serem os mesmos em todas as observações, o modelo será especificado incorretamente e os parâmetros estimados serão, em geral, viesados e ineficientes, o que poderia, por sua vez, levar a inferências inconsistentes (MANNERING, SHANKAR e BHAT, 2016).

Extensões dos modelos ordenados têm sido propostas para contornar algumas de suas limitações. Eluru, Bhat e Hensher (2008) desenvolveram um modelo de probabilidade ordenada generalizada para examinar os níveis de gravidade de acidentes de pedestres e ciclistas nos EUA. Nesse modelo, além de reconhecerem a natureza ordenada das categorias de severidade registrada, permitem uma flexibilização na captura dos efeitos das variáveis explicativas em cada categoria e permite a heterogeneidade nos efeitos dos fatores contribuintes. Outras extensões dos modelos de probabilidade ordenados tradicionais incluem ainda abordagens como os modelos de parâmetros aleatórios e os modelos bayesianos.

2.3.5 Modelos categóricos multinomiais de resposta não ordenada

Modelos que não consideram a natureza ordenada da severidade são também frequentemente utilizados na análise da severidade de lesões em acidentes de trânsito. Embora não respondam pela ordem dos resultados da severidade, esses modelos permitem efeitos variáveis mais flexíveis, pois não impõem nenhuma restrição aos parâmetros e efeitos marginais das variáveis (ABAY, 2013).

O modelo logit multinomial (MLM) é o modelo de resposta não ordenada tradicional. Nessa abordagem a estrutura geral usada para estimar a severidade parte da definição de uma função linear S que determina o resultado da lesão i para a observação n :

$$S = \beta_i X_{in} + \varepsilon_{in} \quad (7)$$

onde β_i é um vetor de parâmetros estimados, X_{in} representa um vetor de características observáveis que afetam a gravidade da lesão sofrida pela observação n , e ε_{in} é um termo de erro que é responsável por efeitos não observados. A probabilidade para cada nível de severidade é dada pela Equação 8, assumindo que ε_{in} é distribuído de forma idêntica e independente com uma distribuição de valor extremo do tipo 1. Os parâmetros podem ser estimados pelo método da máxima verossimilhança. Quando um MLM é estimado, um nível de lesão é usado como um grupo de comparação e, portanto, seus coeficientes são definidos como zero (WASHINGTON, KARLAFTIS e MANNERING, 2003). A análise dos efeitos marginais pode ajudar a avaliar como as variáveis investigadas impactam nas probabilidades de cada nível de severidade.

$$P_n(i) = \frac{e^{\beta_i X_{in}}}{\sum_i e^{\beta_i X_{in}}} \quad (8)$$

Tay *et al.* (2011) estimaram um modelo logit multinomial para identificar os fatores que influenciam a severidade dos acidentes com pedestres na Coreia do Sul. Chen e Fan (2019) desenvolveram um MLM para investigar e identificar fatores contribuintes significativos que determinam a severidade do acidente de veículo com pedestres na Carolina do Norte, Estados Unidos. Os resultados desses estudos estão sujeitos às limitações desse tipo de abordagem.

Uma das limitações do MLM é que ele é construído sob a suposição de que os efeitos não observados são independentes entre os resultados da resposta. No entanto, ele pode ser suscetível ao compartilhamento de efeitos não observados entre as categorias de severidade. Por exemplo, as categorias como lesão leve e moderada são próximas em termos de consequências, gerando muitas vezes até dificuldade do policial em classificar a lesão entre os dois níveis. Dessa forma, é possível que certos fatores não observados, como características do local, aspectos físicos do pedestre ou mesmo seu comportamento durante a travessia, que poderiam influenciar na severidade do acidente, tenham o mesmo efeito nas duas categorias. Matematicamente, isso corresponde à presença de correlação nos termos do erro entre duas ou mais categorias.

Essa suposição é imposta pela premissa de que a razão das probabilidades de quaisquer duas alternativas (categorias de respostas) para uma observação específica não é influenciada por outra, ou seja, assume-se que as categorias sejam independentes. Essa propriedade é denominada de Independência das Alternativas Irrelevantes (IAI) e se violada pode resultar em estimativas erradas dos coeficientes (HOLDRIDGE, SHANKAR e ULFARSSON, 2005; SAVOLAINEN *et al.*, 2011). Portanto, é importante que testes de especificação sejam realizados antes da aplicação do modelo logit multinomial para garantir que a independência de alternativas irrelevantes não seja violada.

Quando a suposição de independência de alternativas irrelevantes é violada, Manski e McFadden (1982) sugerem a utilização de um modelo logit aninhado que é uma generalização do modelo logit multinomial e assume uma distribuição generalizada de valores extremos para o erro. Nessa abordagem os níveis de severidade da lesão são particionados em “ninhos” compostos por resultados de severidade que compartilham alguns elementos não observados específicos apenas para esses resultados. O logit aninhado supera a limitação da IAI e melhora potencialmente o modelo, permitindo correlações entre os termos de erro nos diferentes níveis de gravidade (SAVOLAINEN *et al.*, 2011).

Outra extensão do modelo logit multinomial é o modelo logit de parâmetros aleatórios ou modelo logit misto. Essa abordagem permite que o vetor de parâmetros β_i varie aleatoriamente entre cada usuário envolvido no acidente. Essa variação nos parâmetros induz correlação sobre as alternativas na parte estocástica da função de propensão ao risco (Equação 7). Como resultado, o modelo de parâmetros aleatórios não exibe independência de alternativas irrelevantes. As constantes específicas do resultado da lesão e cada elemento de β_i podem ser fixos ou distribuídos aleatoriamente em todos os parâmetros com meios fixos, permitindo heterogeneidade nos efeitos (TRAIN, 2003; SAVOLAINEN *et al.*, 2011).

Alguns estudos tentaram comparar empiricamente as estruturas de modelos ordenados e não ordenados. De modo geral, cada abordagem tem suas premissas e restrições que têm implicações sobre as inferências dos modelos. Os resultados desses esforços sugerem que a superioridade de uma abordagem sobre a outra pode depender muito dos dados analisados (ABAY, 2013; YE e LORD, 2011; KWIGIZILE, SANDO e CHIMBA, 2011, MANNERING e BHAT, 2014).

A Tabela 3 apresenta uma lista de autores que utilizaram as abordagens mencionadas anteriormente na análise da severidade de lesões com pedestres, bem como os fatores de risco investigados.

Tabela 3: Estudos anteriores sobre análise da severidade de acidentes com pedestres

Autores	Abordagem Empregada	Fatores Investigados
MacLeod <i>et al.</i> (2012)	Logit binário	Características do pedestre; características dos condutores; características do acidente; aspectos da via.
Zahabi <i>et al.</i> (2011)	Logit ordenado	Características do acidente, condições ambientais e características do ambiente construído.
Zajac e Ivan (2003)	Probit ordenado	Características do pedestre; características dos condutores; aspectos da via; condições ambientais; atributos dos veículos.
Eluru, Bhat e Hensher (2008)	Logit ordenado generalizado	Características do pedestre; características dos condutores; atributos dos veículos; aspectos da via; fatores ambientais.
Chen e Fan (2019)	Multinomial logit	Características do pedestre; características dos condutores; aspectos da via; condições ambientais; atributos dos veículos.
Kim <i>et al.</i> (2010)	Logit misto/parâmetros aleatórios	Características do pedestre; características dos condutores; uso do solo; atributos dos veículos; aspectos da via; fatores ambientais.

2.3.6 Instabilidade temporal na análise de dados de acidentes

O centro da análise estatística sobre dados de acidentes se concentra em dois campos. O primeiro está interessado na estimação da frequência de um acidente em geral ou de um acidente com uma gravidade de lesão específica (acidentes com vítimas graves ou fatais, por exemplo). Nesse caso, o foco está na frequência dos acidentes numa determinada entidade (interseção, meio de quadra, corredores etc.) e geralmente não são utilizadas todas as informações detalhadas sobre o acidente, na estimativa dos modelos. O segundo foco está interessado na gravidade das lesões e para isso são utilizadas quase todas as informações detalhadas disponíveis nos bancos de dados, desde informações sobre os veículos às características das vítimas (LORD e MANNERING, 2010; SAVOLAINEN *et al.*, 2011)

Uma limitação relacionada a dados de acidentes consiste no caráter temporal da ocorrência desses eventos e dos fatores de riscos a ela associados. A maioria das análises estatísticas sobre dados de acidentes de trânsito são baseadas na suposição de que os parâmetros estimados na modelagem são temporalmente estáveis. Dessa forma, o efeito dos fatores de risco nas probabilidades de acidentes e na gravidade das lesões resultantes dos acidentes não mudam ao longo do tempo. Essa premissa é geralmente justificada pelo fato de

os acidentes serem eventos relativamente raros e precisam ser normalmente agregados ao longo do tempo (semanas, meses ou anos) pelos analistas para fornecer um número suficiente de observações para a análise estatística.

Entretanto, essa suposição pode ser inconsistente. Os acidentes são resultado das interações entre os usuários e o sistema de transportes, em diversos contextos. Mudanças no comportamento dos usuários, intervenções do sistema ao longo dos anos, entre outros aspectos pode provocar variação no efeito dos determinantes dos acidentes. Mannering (2018) apresenta uma breve discussão, baseada em estudos anteriores da área da psicologia, neurociência e economia, sobre possíveis razões para essa instabilidade temporal. O autor aponta alguns fatores como mudanças temporais na tomada de decisão do motorista, no efeito da percepção de risco, nas atitudes e no comportamento dos usuários e também mudanças no processo de coleta de informações.

No caso da modelagem da severidade de acidentes, alguns estudos relativamente recentes sugerem que a influência de fatores que afetam a gravidade, resultantes dos acidentes, podem não ser estáveis ao longo do tempo. Estudos que analisaram a instabilidade temporal de tais modelos ao longo de períodos maiores indicaram que as estimativas dos parâmetros dos modelos não eram temporalmente estáveis. Behnood e Mannering (2015), usando dados de acidentes com um único veículo, entre os anos de 2004 e 2012 em Chicago (EUA), empregaram um modelo logit multinomial misto e estimaram modelos separados por ano. Para comparar os parâmetros do modelo ao longo dos anos eles calcularam os efeitos marginais e apresentaram comparações gráficas desses efeitos. Os resultados apontaram que o efeito de características da via, aspectos dos veículos e características dos condutores na severidade das lesões sofridas pelos envolvidos variaram significativamente de um ano para o outro.

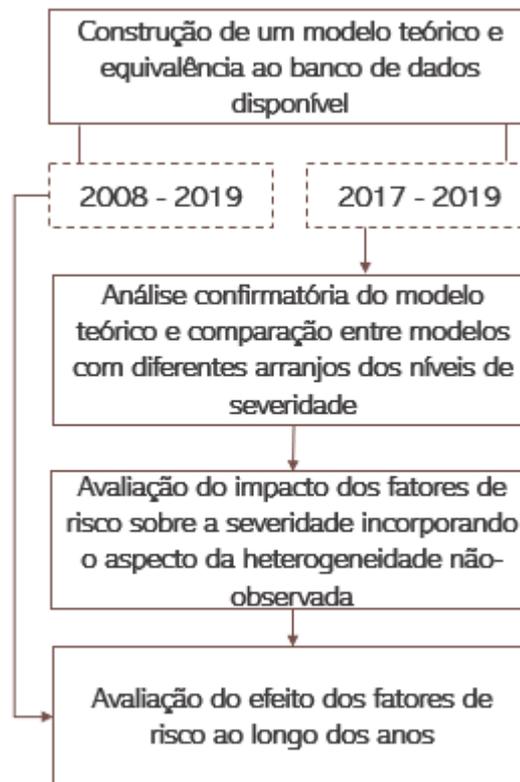
Trabalhos subsequentes desses autores mostraram também instabilidade temporal do efeito dos fatores de risco na severidade de lesões com pedestres (BEHNOOD e MANNERING, 2016) e em acidentes envolvendo caminhões na cidade de Los Angeles (BEHNOOD e MANNERING, 2019). Resultados semelhantes podem ser vistos ainda no trabalho de Alnawmasi e Mannering (2019) que investigaram a instabilidade temporal dos fatores que afetam a gravidade de lesões sofridas por motociclistas em acidentes com um único veículo na Flórida.

Para Mannering (2018), as consequências de ignorar os possíveis efeitos temporais e, portanto, não levar em consideração as mudanças temporais potenciais nos parâmetros estimados, pode afetar as inferências sobre as estimativas do modelo, bem como sua capacidade de ser usado para prever e avaliar os efeitos das contramedidas de segurança. Contudo, o autor destaca que a medição de mudanças temporais em potencial é um problema estatístico extremamente difícil e que a inserção desse aspecto na investigação terá um efeito considerável na complexidade dos processos de modelagem. Porém, é importante para a área de segurança pensar mais cuidadosamente sobre os aspectos temporais nos dados de acidentes e trabalhar para melhorar as especificações e interpretações dos modelos a esse respeito.

3 MÉTODO

A abordagem metodológica utilizada para alcançar o objetivo geral e os objetivos específicos desse trabalho foi realizada a partir das seguintes etapas: i) construção de um modelo teórico e equivalência ao banco de dados disponível; ii) análise confirmatória do modelo teórico e comparação entre modelos com diferentes arranjos dos níveis de severidade, utilizando dados do período de 2017 a 2019; iii) avaliação do impacto dos fatores de risco sobre a severidade incorporando o aspecto da heterogeneidade não observada; iv) avaliação do efeito dos fatores de risco ao longo do tempo, considerando o período de 2008 a 2019. A Figura 5 apresenta o fluxograma das etapas metodológicas definidas nesta pesquisa. As próximas seções apresentam o detalhamento de cada uma delas.

Figura 5: Fluxograma das etapas do método



Fonte: elaborado pelo autor

3.1 Construção de um modelo teórico e equivalência ao banco de dados disponível

No processo de construção de um modelo a seleção das variáveis é uma das etapas mais importantes. Os critérios para inclusão de uma variável em um modelo podem variar de um problema para outro, dependendo dos objetivos da análise. Os dados disponíveis para o analista são muitas vezes limitados e muitos fatores que podem afetar a severidade dos

acidentes nem sempre são passíveis de observação e coleta. Além disso, a inclusão de mais variáveis em um modelo pode aumentar os erros padrões estimados e tornar o modelo mais dependente dos dados observados (MANNERING e BHAT, 2014; HOSMER, LEMESHOW e STURDIVANT, 2016).

Um método comumente empregado para seleção de variáveis é o método de seleção automática *stepwise*, no qual as variáveis são selecionadas para inclusão no modelo com base apenas em critérios estatísticos. Um dos motivos que torna o método de seleção *stepwise* atraente é a possibilidade de examinar diversos modelos rapidamente e de forma automática. Contudo, há algumas críticas em relação à essa abordagem. Hosmer, Lemeshow e Sturdivant (2016) destacam que esse procedimento retira do analista o poder de julgamento sobre o processo de escolha das variáveis e como resultado ele não tem oportunidade de examinar cuidadosamente os modelos antes que o “melhor modelo” seja escolhido. Para os autores, apenas quando o analista entende os pontos fortes e limitações dos métodos é que essa abordagem pode servir como ferramenta útil no processo de construção do modelo.

Para esse trabalho, no entanto, propõe-se inicialmente a definição de um modelo teórico centrado em dois pontos-chave discutidos na revisão da literatura e com base na abordagem dos Sistemas Seguros: a energia do impacto e a tolerância do corpo humano a esse impacto. A esses dois aspectos são combinados fatores de risco que se acredita estarem relacionados ou terem influência sobre eles e que indiretamente estariam associados ao resultado das lesões. Nesse ponto, tem-se o esforço de representar esses fatores de risco através das variáveis disponíveis nos bancos de dados de acidentes. Contudo, é importante destacar que nem todos esses fatores de risco terão variáveis para representá-los. As relações estabelecidas nesse modelo teórico serão verificadas e confirmadas por meio da estimação de modelos categóricos.

Os dados necessários para realização desse trabalho são provenientes do Sistema de Informações de Acidentes de Trânsito de Fortaleza (SIAT-FOR), gerido pela Autarquia Municipal de Trânsito e Cidadania (AMC), órgão municipal responsável pela regulação e fiscalização das atividades relacionadas ao trânsito na cidade. O SIAT-FOR recebe informações de acidentes de diversas fontes (agentes de trânsito, Serviço de Atendimento Móvel de Urgência – SAMU, hospitais, IML, entre outras), as quais são tratadas pelos técnicos da AMC. Esses dados consistem em registros individuais com informações das vítimas, características dos veículos envolvidos e aspectos relacionados ao acidente. Vale

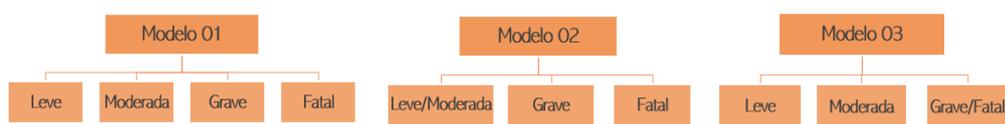
ressaltar que grande parte dos registros de acidentes possuem ainda informações georreferenciadas acerca da localização das ocorrências. O banco de dados do SIAT contém registros de atropelamentos ocorridos entre os anos de 2004 e 2019. De modo a avaliar uma condição mais atual dos dados, para as etapas ii e iii serão utilizados apenas os registros de acidentes dos anos de 2017 a 2019. Já para a etapa iv (análise temporal) serão utilizados os dados de 2008 a 2019.

3.2 Análise confirmatória do modelo teórico e comparação entre modelos com diferentes arranjos dos níveis de severidade

Nesta etapa será aplicada uma análise multivariada para a confirmação das relações do modelo teórico e comparação entre modelos com agregações diferentes dos níveis de severidade. Para isso, serão estimados três modelos categóricos (Figura 6). No Modelo 01, a variável resposta corresponde ao arranjo com as quatro categorias disponíveis no banco de dados: leve, moderada, grave e fatal. No Modelo 02, as categorias leve e moderada foram unidas em uma única categoria, devido à proximidade em termos de consequência do acidente o que poderia gerar possíveis divergências na classificação entre esses dois níveis pelos agentes responsáveis. E no Modelo 03 optou-se por unir as lesões graves e fatais em uma categoria, tomando como base os princípios dos Sistemas Seguros e Visão Zero, que tem como objetivo a extinção de lesões graves e fatais no trânsito.

Como mencionado, para esta etapa serão utilizados os atropelamentos ocorridos entre os anos de 2017 e 2019. As observações com campos sem informações referentes às variáveis investigadas foram eliminadas da amostra inicial, resultando em uma amostra de 2.660 observações de vítimas de atropelamentos. Dessa amostra 54% correspondem a lesões leves, 26% a lesões moderadas, 11% lesões graves e 9% a fatalidades.

Figura 6: Arranjos dos níveis de severidade de cada modelo investigado



Fonte: elaborado pelo autor

O tipo de modelo categórico utilizado será o modelo logit multinomial (MLM). Apesar de não considerar a ordem dos níveis de severidade esse tipo de modelo consegue identificar as influências que uma mesma variável exerce nos diferentes níveis de severidade

de forma independente. Vale salientar que a utilização desses modelos categóricos na avaliação da severidade tem como foco compreender como os fatores de risco podem impactar nas probabilidades previstas de cada nível de severidade.

Como visto na revisão da literatura existe outros tipos de modelos categóricos com vantagens sobre algumas limitações dos modelos tradicionais ordenados ou não ordenados, como é o caso do modelo logit generalizado ou do modelo logit de parâmetros aleatórios. No entanto, para essa etapa que tem como foco a confirmação das relações entre os fatores de risco e a severidade, definidas no modelo teórico, e a escolha de uma melhor agregação para os níveis de severidade, os modelos multinomiais são adequados.

Antes de estimar os modelos, Agresti (2006) recomenda verificar a quantidade de preditores possíveis para um modelo em caso de desbalanço nas categorias da variável resposta. Peduzzi *et al.* (1996) sugere que o modelo não deve conter mais do que $n/10$ parâmetros, onde n representa o número de observações da categoria com a menor frequência, para evitar problemas de variâncias superestimadas e subestimadas. Dos modelos propostos deve-se atentar ao Modelo 02 que com a união dos níveis leve e moderado numa única categoria engloba 80% da amostra, enquanto as categorias grave e fatal representam 11% e 9%, respectivamente.

Para a estimação do MLM é necessário estabelecer uma categoria da variável resposta como referência. Neste caso, será adotada a categoria *lesão leve* para o Modelo 01 e Modelo 03 e a categoria *lesão leve/moderada* para o Modelo 02. Após a estimação a importância de cada variável nos modelos será avaliada usando o valor p da estatística de Wald. Para essa etapa, adotou-se um nível de significância de 0,10, para evitar a exclusão de variáveis possivelmente importantes. Vale lembrar que nos MLM são estimados parâmetros para cada relação entre a categoria de referência e as demais categorias. Dessa forma a variável só será removida quando nenhum dos parâmetros estimados para ela for significativo.

Em seguida será verificada a qualidade do ajuste de cada modelo. Para isso serão realizados dois testes: o teste de significância do modelo e o teste de Hosmer-Lemeshow. O primeiro compara o modelo proposto com o modelo contendo apenas o intercepto para verificar a hipótese de que as variáveis incluídas no modelo melhoram significativamente seu poder preditivo quando comparado com o valor do intercepto. A estatística de teste corresponde à diferença entre a verossimilhança entre os dois modelos e a hipótese nula é que

o modelo apenas com o intercepto tem um ajuste tão bom quanto o modelo com as variáveis explicativas.

Diferentemente do modelo de regressão logística binária, que tem como resultado um único valor ajustado $P(Y = 1|X)$, em um modelo multinomial com quatro categorias, existem três probabilidades estimadas. Fageland, Hosmer e Bonfin (2008) desenvolveram uma extensão do teste de Hosmer-Lemeshow, utilizado em modelos binários, para o modelo logit multinomial.

O teste é baseado na divisão da amostra segundo suas probabilidades ajustadas com base nos valores dos parâmetros estimados pela regressão. No caso no modelo multinomial, as observações são ordenadas usando os valores do complemento da estimativa da probabilidade da categoria de referência $P(Y=0|x)$ e agrupadas em g grupos de tamanho iguais, de modo que o primeiro grupo contenha as observações com os menores valores de $1 - P(Y=0|x)$ e o último grupo as observações com os maiores valores. É recomendado pelo menos 10 grupos para o teste. A estatística de teste é dada pela Equação 9, em que n_{vj} representa o número de observações pertencentes ao v -ésimo grupo e a j -ésima categoria e E_{vj} representa o número esperado de observações pertencentes ao v -ésimo grupo e a j -ésima categoria. C_g segue uma distribuição qui-quadrado com $(g - 2) \times (c - 2)$ graus de liberdade. Um valor p não significativo indica que não há evidências de que as frequências observadas e esperadas sejam diferentes (ou seja, evidências de bom ajuste).

$$C_g = \sum_{v=1}^g \sum_{j=1}^c \frac{(n_{vj} - E_{vj})^2}{E_{vj}} \quad (9)$$

Para efetivar a comparação entre os modelos serão adotadas duas métricas como critério: o *Akaike Information Criterion* (AIC) e o R^2 de McFadden. O AIC é uma medida de ajuste frequentemente utilizada para comparar modelos não aninhados e baseia-se no ponto máximo da função de logaritmo da verossimilhança, com o acréscimo de uma penalidade associada ao número de parâmetros do modelo (GREENE e HENSHER, 2010). Valores menores do AIC são preferíveis.

$$AIC = -2 \log(L) + 2p \quad (10)$$

Onde:

L é o máximo valor da função de máxima verossimilhança para o modelo estimado;

p é o número de parâmetros incluídos no modelo.

No modelo de regressão linear, o coeficiente de determinação (R^2) resume a proporção da variabilidade na variável dependente associada às variáveis independentes, com valores maiores de R^2 indicando que mais da variação é explicada pelo modelo. Já nos modelos de regressão com uma variável dependente categórica, o R^2 (denominado também de Pseudo - R^2) não mede essa variação, mas ele representa a proximidade do modelo proposto com um modelo base, geralmente o modelo nulo (GREENE e HENSHER, 2010). É importante destacar que seu valor tende a ser consideravelmente mais baixo do que o esperado para o R^2 da regressão linear. Valores entre 0,2 e 0,4 podem representar um ajuste excelente (ORTÚZAR e WILLUMSEN, 2011). O R^2 de McFadden é expresso por:

$$R^2 = 1 - \frac{\text{Log}(Lc)}{\text{Log}(at\ zero)} \quad (11)$$

Em que:

$\text{Log}(Lc)$ é logaritmo da verossimilhança do modelo proposto

$\text{Log}(at\ zero)$ é logaritmo da verossimilhança do modelo nulo (modelo sem coeficientes)

Antes de passar para a próxima etapa utilizando a agregação dos níveis de severidade do modelo com o melhor desempenho para essas métricas estabelecidas, será realizado o teste de Hausman-McFadden para verificação da premissa de Independência das Alternativas Irrelevantes (IAI) para modelos multinomiais. Esse teste baseia-se na comparação do modelo com todas as categorias da variável resposta (modelo completo) e outro modelo no qual se elimina os dados de uma determinada categoria (modelo reduzido). Se os parâmetros do modelo reduzido não mudarem significativamente em relação ao modelo completo, então não se pode rejeitar a hipótese nula de que a premissa do MLM se verifica (Hausman e McFadden, 1984).

3.3 Avaliação do impacto dos fatores de risco sobre a severidade incorporando o aspecto da heterogeneidade não-observada.

Para avaliar o impacto das variáveis na severidade incorporando o aspecto da heterogeneidade não-observada será utilizada uma generalização dos modelos multinomiais tradicionais. Os modelos de parâmetros aleatórios ou modelos logit mistos superam algumas das limitações do logit multinomial permitindo que os efeitos dos fatores de risco sobre a severidade das lesões variem entre as observações para explicar a heterogeneidade não observada dos dados. Os modelos de parâmetros aleatórios permitem ainda a correlação de fatores não observados entre as categorias da variável resposta, não sendo dessa forma

condicionados à premissa da IAI (TRAIN, 2003). Este modelo inicia-se definindo uma função que determina a probabilidade dos resultados das lesões (WASHINGTON, KARLAFTIS e MANNERING, 2003):

$$S_{in} = \beta_i X_{in} + \varepsilon_{in} \quad (12)$$

Onde, β_i representa um vetor de parâmetros estimáveis para o resultado da lesão i , X_{in} é um vetor de fatores de risco que afetam a severidade para cada observação n , e ε_{in} é um termo de erro. Para se chegar ao modelo logit misto, parâmetros aleatórios são introduzidos com uma função de densidade $f(\beta|\varphi)$, em que φ é um vetor de parâmetros que descrevem a função densidade. Essa função de densidade pode assumir uma ampla faixa de distribuições. As mais empregadas são a distribuição uniforme, triangular, normal e log-normal. Para este trabalho a forma funcional da função de densidade utilizada foi a distribuição normal, pois foi a distribuição que forneceu o melhor ajuste estatístico.

As probabilidades do logit misto são a integral das probabilidades do logit multinomial tradicional, expressas na forma:

$$P_{in}(i) = \int \frac{e^{\beta_i X_{in}}}{\sum_l e^{\beta_l X_{in}}} f(\beta|\varphi) d\beta \quad (13)$$

As probabilidades estimadas pelo modelo logit misto são uma média ponderada para diferentes valores de β_i entre as observações, onde alguns elementos do vetor β_i podem ser fixos e alguns podem ser distribuídos aleatoriamente. A estimativa do modelo logit de parâmetros aleatórios mostrado na Equação 13 pode ser realizada usando abordagens de máxima verossimilhança simuladas, em que as probabilidades são aproximadas desenhando-se valores de β_i da $f(\beta|\varphi)$ para valores dados de φ .

Estudos anteriores demonstraram que o uso da sequência de Halton produz aproximações para a integração numérica que são mais precisas do que desenhos puramente aleatórios (Train, 2013; Gkritza e Mannering 2008). Para este trabalho foram testadas simulações com 100, 150 e 200 sorteios de Halton. Os resultados mostraram uma consistência nos parâmetros significativos em termos de magnitude e sinal do parâmetro. Dessa forma, optou-se por estimar os modelos com simulações de 100 sorteios de Halton, pois exigem um esforço computacional menor.

As variáveis investigadas no modelo de parâmetros aleatórios serão as mesmas presentes no modelo com melhor desempenho na etapa de comparação entre as diferentes

agregações dos níveis de severidade. Em relação a seleção dos parâmetros a serem aleatorizados não há conhecimento prévio sobre esse procedimento. Assim, seguindo o trabalho de Kim et al. (2013), cada variável é testada no modelo como fixa ou aleatória. Esse processo é feito de forma gradual, partindo-se do modelo logit multinomial tradicional com todas as variáveis fixas. A ordem da inserção das variáveis com parâmetros aleatórios foi baseada na significância estatística de cada uma das variáveis no modelo multinomial tradicional. A decisão sobre a aleatoriedade dos parâmetros é baseada tanto na sua significância estatística quanto na significância do seu parâmetro de dispersão. Nesse sentido, um parâmetro aleatório é usado quando a média e o desvio padrão do parâmetro é estatisticamente significativo, caso contrário, os parâmetros são fixos em todas as observações. Esse critério foi também adotado nos trabalhos de Cunto e Ferreira (2017) e Ferreira, Amorim e Couto (2016).

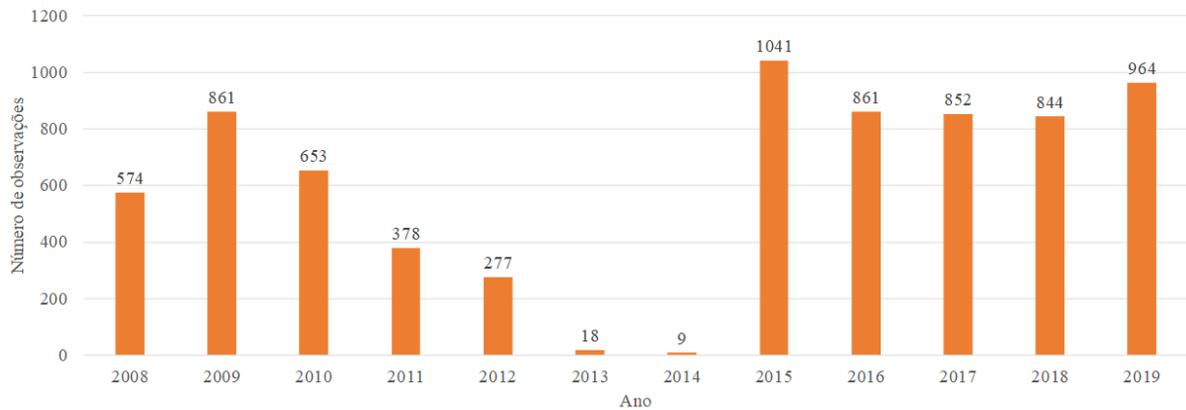
Para avaliar o efeito das variáveis nas probabilidades de cada nível de severidade serão calculados os efeitos marginais de cada preditor. Um método para explorar os efeitos marginais em variáveis categóricas binárias é calcular a mudança na probabilidade prevista quando uma variável é trocada de 0 para 1, ou vice-versa. Esse resultado é chamado de pseudo-elasticidade direta e expresso pela Equação 14 (WASHINGTON, KARLAFTIS e MANNERING, 2003).

$$E = \frac{P[Y=i|x=1] - P[Y=i|x=0]}{P[Y=i|x=0]} \quad (14)$$

3.4 Avaliação do efeito dos fatores de risco ao longo dos anos

A princípio esta etapa avaliaria o período entre os anos de 2011 e 2019, que correspondem respectivamente ao primeiro e ao penúltimo ano da Década de Ação pela Segurança Viária, proposta pela ONU em 2010. Contudo, durante os anos de 2011 e 2014 observou-se uma lacuna na consolidação das informações referentes aos acidentes por parte do SIAT, especialmente, aqueles de menor gravidade, o que acarretou num número baixo de observações que contivessem todas as variáveis investigadas (Figura 7).

Figura 7: Frequência de observações



Fonte: elaborado pelo autor

Diante disso, optou-se por excluir esse período de quatro anos do estudo e incorporar à análise os anos de 2008, 2009 e 2010, período anterior ao início da Década de Ação. Entende-se que essa alteração não trará prejuízos a análise tendo em vista que apesar da Década de Ação ter início em 2011, ações mais efetivas de priorização da segurança viária em Fortaleza só foram de fato aplicadas a partir de 2015.

Para efetivar a análise temporal do efeito dos fatores de risco optou-se ainda por agrupar os dados em três períodos específicos: o primeiro com os anos de 2008 a 2010, que corresponde ao período pré-década de ação; o segundo com os anos de 2015 e 2016, referente ao início de ações mais efetivas para melhoria da segurança viária na cidade; e o terceiro com o intervalo de tempo entre os anos de 2017 e 2019, que corresponde aos anos finais da Década de Ação. Estudos anteriores como os de Behnood e Mannering (2016) e Marcoux *et al.* (2018) também agruparam os dados de anos consecutivos em períodos específicos.

O efeito dos fatores de risco foi mensurado a partir da estimativa de modelos categóricos através de duas abordagens. A primeira consistiu em estimar um único modelo utilizando todos os dados disponíveis e assumindo o tempo (período) como uma variável explicativa. Espera-se com esse modelo avaliar uma possível tendência nas probabilidades de cada nível de severidade com o tempo. Para isso, analisou-se um cenário de referência, ou seja, com as mesmas características para as variáveis estudadas e calculou-se a variação nas probabilidades previstas de cada nível de severidade dos dois últimos períodos em relação ao primeiro. Já na segunda abordagem foram estimados modelos para cada um dos períodos. Neste caso, o objetivo é avaliar mudanças na significância e no efeito sobre a severidade de cada fator de risco ao longo do tempo. Para a variável resposta foi utilizado o arranjo definido

pelo modelo que apresentou o melhor desempenho na análise comparativa entre as diferentes configurações da severidade.

Em relação ao tipo de modelo utilizado, Mannering (2018) destaca que se os efeitos das variáveis explicativas mudam globalmente ao longo do período de observação, uma variável pode ter parâmetros diferentes entre as observações já que cada observação é um acidente que ocorre em um ponto específico do tempo. Os modelos de heterogeneidade capturarão esse efeito estimando diferentes parâmetros entre as observações para uma ou mais variáveis explicativas, mas o analista não será capaz de distinguir a heterogeneidade não observada induzida por variações temporais daquela de outras fontes. Assim, apesar das vantagens dos modelos de parâmetros aleatórios, mencionadas anteriormente, nesta etapa optou-se por utilizar os modelos multinomiais tradicionais.

Para testar estatisticamente se os modelos propostos para os diferentes períodos são em geral temporalmente estáveis, uma série de testes de razão de verossimilhança foram realizadas. Essa abordagem foi usada também em estudos anteriores como os de Behnood e Mannering (2016), Alnawmasi e Mannering (2019) e Behnood e Mannering (2019).

Essa série de testes foi conduzida para examinar a estabilidade temporal dos fatores de risco em períodos consecutivos. Vale destacar que apesar da lacuna de tempo entre o primeiro e o segundo período, pelos motivos já mencionados, para efeito de análise eles serão considerados como consecutivos. A estatística de teste segue uma distribuição χ^2 (com graus de liberdade igual ao somatório do número de parâmetros significativos nos modelos de cada período menos o número de parâmetros significativos no modelo geral) e expressa por:

$$\chi^2 = -2[LL(\beta_{m_i m_{i+1}}) - LL(\beta_{m_i}) - LL(\beta_{m_{i+1}})] \quad (15)$$

Onde $LL(\beta_{m_i m_{i+1}})$ é a verossimilhança de um modelo usando os dados dos períodos m_i e m_{i+1} , $LL(\beta_{m_i})$ é a verossimilhança de um modelo usando os dados do período m_i e $LL(\beta_{m_{i+1}})$ é a verossimilhança de um modelo usando os dados do período m_{i+1} . Neste teste, as mesmas variáveis são usadas em todos os três modelos. A estatística χ^2 resultante pode ser usada para determinar se a hipótese nula de que os parâmetros são iguais nos dois períodos pode ser rejeitada (WASHINGTON, KARLAFTIS e MANNERING, 2003).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Modelo teórico

O modelo teórico proposto aqui tem como base dois pontos-chave discutidos no capítulo 2, relativo à revisão da literatura: a energia do impacto e a tolerância do corpo humano a esse impacto. A energia do impacto é resultado da velocidade do veículo no momento do impacto e da sua massa. Além disso, características do veículo como a rigidez e a geometria, podem ser também determinantes na forma como essa energia é transferida para a vítima. Já a tolerância do pedestre ao impacto está ligada as condições físicas do corpo humano de resistir a transferência de energia no momento do acidente e a área do corpo atingida. A Figura 8 ilustra a base do modelo teórico.

Figura 8: Modelo teórico base



Fonte: elaborado pelo autor

Esses aspectos representados pelos retângulos em laranja e azul, no entanto, não são medidos diretamente e dificilmente estão disponíveis nos bancos de dados de acidentes. Dessa forma, incorporam-se ao modelo teórico fatores que possam refletir os efeitos desses aspectos não medidos a partir da revisão da literatura e de uma correspondência com as variáveis disponíveis no banco de dados.

Em relação ao resultado do acidente, o SIAT-FOR utiliza cinco níveis de classificação da severidade das lesões: ileso, lesão leve, moderada, grave e fatal. Essas informações são obtidas especialmente do relatório da central de regulação do SAMU que atende aos chamados da ocorrência e encaminham as equipes para prestarem o atendimento. A central de regulação classifica a gravidade da ocorrência com base na necessidade de urgência no atendimento e de acordo com o estado de saúde da vítima durante os primeiros

socorros. Essas informações são atualizadas com dados da secretaria de saúde do município em caso de falecimento da vítima em até um ano após a ocorrência do acidente.

A categoria “ileso”, no entanto, foi desconsiderada nesse estudo devido ao número muito baixo de observações encontrada no banco de dados. Esse aspecto é bastante comum nos bancos de dados de acidentes, visto que acidentes sem vítimas feridas são menos prováveis de serem relatados, em razão de geralmente não haver o acionamento dos órgãos responsáveis para prestar atendimento. Além disso, dificilmente um atropelamento resultará em vítima ileso, o que reduz também o número de registros desta categoria.

A partir do modelo teórico proposto foram definidas variáveis que representassem os fatores de risco que poderiam ter influência na severidade das lesões do pedestre quando envolvido em um acidente de trânsito. Esse processo de especificação das variáveis levou em consideração a disponibilidade de dados e adequação da variável à metodologia proposta.

Além das informações coletadas do SIAT-FOR, foram utilizadas ainda as bases georreferenciadas de semáforos e equipamentos de fiscalização eletrônica, fornecidas pelo órgão gestor de trânsito do município, para a determinação de variáveis relacionadas a rede viária. Com auxílio do software *QGIS* foi traçado um *buffer* ao redor do acidente. Estudos anteriores trabalharam com *buffers* de raios entre 50 e 600 metros ao redor do acidente para a coleta de variáveis relacionadas especialmente ao ambiente construído ou uso do solo (MIRANDA-MORENO, MORENCY e EL-GENEIDY, 2011; ZAHABI *et al.*, 2011; PRATO *et al.*, 2017). Com o intuito de verificar a presença de semáforos ou equipamentos de fiscalização eletrônica e sabendo-se que geralmente os condutores reduzem a velocidade apenas na aproximação com o equipamento e logo em seguida aumentam novamente a velocidade, optou-se por considerar neste estudo um *buffer* de 100 metros de raio

Alguns dos fatores investigados na literatura têm uma relação mais clara e podem ser entendidos como variáveis *proxy* para determinado aspecto não medido, como é o caso do tipo de veículo que reflete o efeito de veículos de diferentes massas e formatos. Outros fatores, no entanto, são investigados por terem influência ou estarem relacionados a esses aspectos não medidos e que indiretamente poderiam ter implicações no resultado da lesão, como é o caso dos fatores ligados a velocidade do veículo no momento do impacto com o pedestre.

A classificação viária é uma variável comumente analisada devido ao fato de representar distintas características da via como número de faixas, largura das faixas,

velocidades máximas permitidas, além de estar também associada a diferentes condições de fluxo veicular entre outros aspectos que podem influenciar na velocidade atingida pelo condutor. O horário de pico do tráfego é outro aspecto que tem também influência sobre as velocidades atingidas, já que nesse horário esperam-se velocidades mais baixas dos veículos devido ao volume elevado.

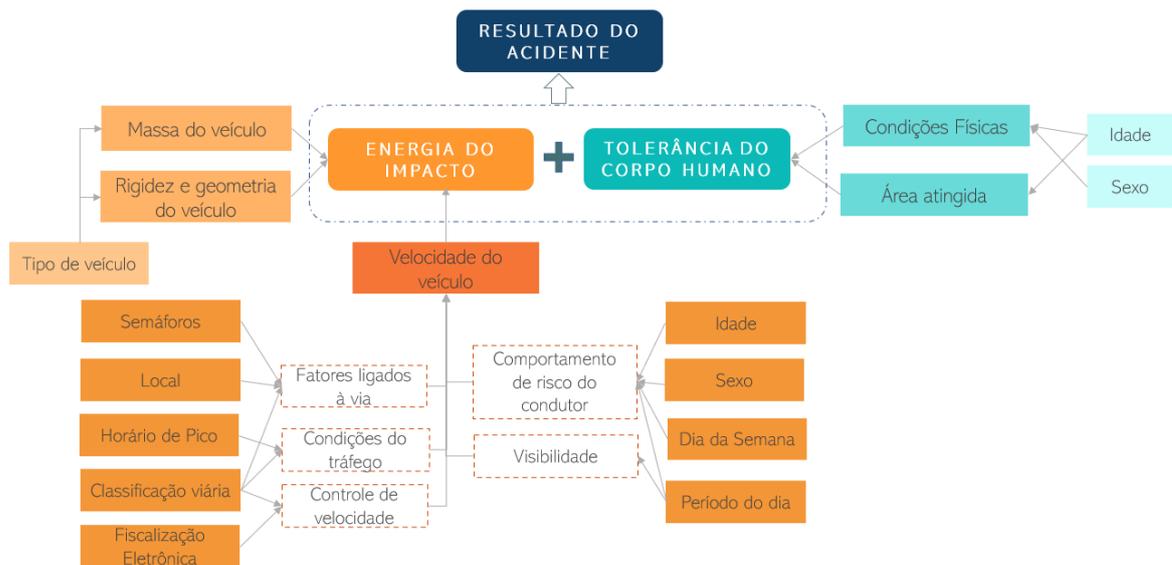
A presença de equipamentos de fiscalização eletrônica está relacionada ao controle de velocidade nas vias e pode inibir infrações dos condutores como trafegar acima dos limites de velocidade estabelecidos. Consequentemente têm influência nas velocidades desempenhadas. Porém, vale destacar que a depender do limite de velocidade que este equipamento esteja monitorando, o acidente ainda pode resultar em lesões de severidade elevada. Além disso, alguns condutores podem reduzir a velocidade apenas num trecho bem próximo do equipamento e logo em seguida aumentar sua velocidade, o que pode dificultar a avaliação do efeito da presença desse tipo de equipamento na severidade.

A instalação de semáforos em um determinado local pode ser justificada pelo grande volume de pedestres circulando. Nesse sentido, os semáforos podem reduzir os conflitos de tráfego e oportunizar travessias mais seguras para os pedestres à medida que controla os movimentos dos usuários da via. Além disso, os condutores normalmente exercem mais cautela e dirigem em velocidades relativamente mais baixas em comparação com trechos não semaforizados.

A velocidade é ainda influenciada pelo comportamento de risco dos condutores, que pode ser representado pelo sexo e idade e indiretamente pelo período do dia e dia da semana. Esses dois últimos, pela hipótese de que há uma prevalência maior de condutores sob efeito de bebidas alcólicas durante o período noturno e também aos finais de semana. Além disso, o fluxo mais baixo nesses períodos pode instigar o condutor a dirigir em velocidades maiores.

O período do dia está ligado as condições de visibilidade devido a iluminação do ambiente. Durante o dia a visão dos condutores e pedestres não é tão prejudicada e eles podem detectar melhor os outros usuários da via, o que lhes possibilita realizar ações evasivas ou reduzir a velocidade. Por fim, características como a idade e o sexo do pedestre são relevantes à medida que podem estar relacionadas tanto à vulnerabilidade ao impacto do acidente como também à área do corpo atingida. Os fatores mencionados anteriormente são comumente investigados nos estudos de segurança viária e estão presentes na maioria dos modelos de severidade de acidentes e por isso foram incorporados ao modelo teórico apresentado na Figura 9.

Figura 9: Modelo Teórico



Fonte: elaborado pelo autor

Algumas adaptações foram necessárias para representar esses fatores e facilitar o entendimento e utilização dessas variáveis nas análises posteriores. A Tabela 4 apresenta a lista de variáveis obtidas, bem como a codificação definida para cada uma delas, juntamente com a proporção de cada variável na amostra utilizada. As variáveis foram divididas em quatro grupos: pedestre, condutor, acidente e rede viária. Todas elas foram codificadas como variáveis categóricas. Para os fatores com mais de dois níveis definiu-se uma categoria como referência, de modo que o número de variáveis *dummy* fosse igual ao número de categorias menos 1. Entre as características do pedestre, além da variável referente ao sexo, foram incluídas três variáveis relacionadas a idade para representar as diferentes faixas etárias: crianças, jovens, adultos e idosos. O mesmo foi feito para idade dos condutores para representar a faixa etária de jovens, adultos e idosos.

Tabela 4: Descrição das variáveis independentes e proporção na amostra

Variável	Descrição
<i>Pedestre</i>	
Sexo	1 – Homem (66%); 0 – Mulher (34%)
Ida_0_15	1 - Pedestre com idade até 15 anos (7%); 0 – Outra
Ida_16_30	* Pedestre com idade entre 16 e 30 anos (21%);
Ida_31_60	1 - Pedestre com idade entre 31 e 60 anos (52%); 0 - Outra
Ida_M60	1 - Pedestre com idade acima de 60 anos (20%); 0 -Outra
<i>Condutor</i>	
Sexo_C	1 – Homem (84%); 0 – Mulher (16%);
Ida_C18_30	* Condutor com idade entre 18 e 30 anos (45%);
Ida_C31_60	1 - Condutor com idade entre 31 e 60 anos (52%); 0 – Outra;
Ida_C60	1- Condutor com idade acima de 60 anos (3%); 0 – Outra.
<i>Acidente</i>	
FDS	1 - Final de semana (sábado e domingo) (30%); 0 – Segunda a sexta (70%);
Noite	1 - 18 às 5hrs (43%); 0 - 5 às 18hrs (57%);
Hora_pico	1 - 7 às 9hrs e 17 às 19hrs (28%); 0 - Demais horas (72%);
M_Quadra	1 - Meio de quadra (83%); 0 – Interseção (17%);
Auto	*Carro de passeio (46%);
Veic_Pes	1 - Veículo pesado (8%); 0 – Outro;
Moto	1 – Moto (46%); 0 – Outro;
<i>Rede viária</i>	
V_Loc	*Via Local (49%);
V_Col	1 - Via coletora (4%); 0 - Outra;
V_Art	1 - Via arterial (35%); 0 – Outra;
V_Exp	1 - Via expressa (12%); 0 – Outra;
P_EQUI_FE	1 - Presença de equipamento de fiscalização eletrônica em um raio de 100 metros do local do acidente (6%); 0 – Ausência;
P_SEM	1 - Presença de semáforos em um raio de 100 metros do local do acidente (30%); 0 – Ausência;

*Variável de referência

Em relação aos acidentes, o SIAT registra a hora, o dia e o mês de cada atropelamento ocorrido no ano em questão. Desses registros foram criadas três variáveis: o dia da semana, dividido entre segunda a sexta e finais de semana (sábado e domingo); o período do dia, dividido entre período diurno (05:00 às 18:00) e período noturno (18:00 às 05:00); e se o acidente ocorreu num horário de pico (07:00 às 9:00 ou 17:00 às 19:00) ou em outro horário.

O local de ocorrência foi dividido entre interseção e meio de quadra. Já em relação ao tipo de veículo foram avaliadas três categorias, correspondentes a veículos de passeio, motocicletas e veículos pesados. Esse último abrange veículos como ônibus, micro-ônibus, caminhonetes e caminhões. Por fim, quanto à rede viária, foram criadas variáveis referentes à classificação viária, a presença de equipamentos de fiscalização eletrônica e semáforos num raio de 100 metros do local do acidente.

4.2 Análise comparativa entre modelos com diferentes arranjos dos níveis de severidade

A Tabela 5 sintetiza os resultados dos parâmetros estimados para os três modelos escolhidos para a análise comparativa das diferentes agregações de severidade. De modo geral, a maioria das relações entre os fatores de risco e o resultado das lesões nos pedestres, estabelecidas no modelo teórico, foi reforçada e confirmada nos modelos categóricos propostos. Dos fatores investigados, somente as variáveis referentes à idade do condutor, à presença de fiscalização eletrônica próximo ao local do acidente e horário de pico não foram significativas em nenhum dos modelos analisados. Estas variáveis foram removidas dos modelos estimados.

Considerando a recomendação de Agresti (2006) a respeito do número de preditores no modelo, a categoria de menor frequência apresenta 227 observações, o que dá em torno de 22 o número máximo de parâmetros permitidos para que não haja problemas com o modelo devido a um desbalanceamento das categorias da variável resposta. Como observado na Tabela 5 esse número não foi atingido.

No Modelo 01 correspondente ao arranjo com quatro categorias de severidade, tomando a categoria *leve* como referência, os parâmetros são estimados para as demais categorias em relação a ela. A variável *Ida_15_30* também não obteve parâmetros estatisticamente significativos em nenhuma das categorias e foi removida desse modelo. Já no Modelo 02, as variáveis *M_Quadra* e *Moto* não obtiveram parâmetros significativos no modelo e foram removidas. E no Modelo 03, somente as variáveis *Sexo_C* e *P_SEM* não obtiveram parâmetros significativos em nenhuma das categorias. As demais variáveis apresentaram-se significativas em pelo menos uma categoria e foram mantidas nos modelos.

Com o intuito de avaliar diferentes configurações dos níveis de severidade na modelagem, foi realizada uma análise comparativa entre os modelos estimados. Em relação à significância das variáveis, notou-se que os parâmetros significativos para a mesma categoria nos diferentes modelos permaneceram semelhantes tanto na magnitude quanto no sinal do parâmetro. Isso pode ser verificado nas variáveis *Sexo* e *FDS* para a categoria fatal dos Modelos 01 e 02. Algumas variáveis foram significativas em pelo menos uma categoria de gravidade nos três modelos estimados, como a variável *Veic_Pes*.

Por outro lado, algumas variáveis deixaram de ser significativas com a união dos níveis de gravidade, como é o caso da variável *Sexo_C*, que foi significativa para a categoria fatal nos dois primeiros modelos e deixou de ser significativa com a combinação das lesões graves e fatais no Modelo 3. Nesse sentido, pode-se dizer que há uma diferenciação entre motoristas homens e motoristas mulheres nos acidentes que resultam em vítimas fatais, o que não ocorre nas demais categorias de gravidade. Ao unir as categorias, o modelo não consegue capturar essa distinção entre o gênero do motorista no resultado das lesões. O mesmo ocorreu com a variável *P_SEM*, mas com significância nos dois primeiros modelos em relação à categoria grave. Nesse caso, é possível observar uma distinção entre os locais com e sem a presença de semáforos nos acidentes com lesões graves. Porém, o modelo não consegue captar essa diferença nas lesões fatais e com a união desses dois níveis o parâmetro acaba perdendo sua significância.

Diante disso, é possível perceber que as variáveis efetivamente têm efeitos diferentes nos diferentes níveis de gravidade. O fato de a combinação dos níveis de gravidade levar a diferentes variáveis significativas para os modelos sugere que, dependendo da especificação da variável resposta, as informações obtidas em um modelo podem ignorar o efeito de importantes fatores de risco.

Conhecendo essas limitações para a especificação da variável resposta, é importante estabelecer um critério que permita a adoção do melhor modelo para a análise dos fatores de risco. Os três modelos foram avaliados quanto a qualidade do ajuste por meio de um teste de verossimilhança e do teste de Hosmer-Lemeshow. Em relação ao teste de verossimilhança, os três modelos obtiveram significância aproximadamente igual a zero corroborando com a hipótese de que as variáveis independentes melhoram o ajuste do modelo.

De acordo com o teste de Hosmer-Lemeshow, não há evidências para rejeitar a hipótese nula (evidência de bom ajuste) para os dois primeiros modelos estimados. O teste é baseado na comparação entre frequências observadas e esperadas em grupos de observações definidas pela probabilidade estimada. É possível que diferentes escolhas da categoria de referência, como no caso do Modelo 02, que tem como categoria base a junção dos níveis leve e moderado, resultem em conclusões diferentes para o teste. Fagerland et al. (2008) apontam que a sensibilidade do teste para a escolha da categoria de referência é geralmente pequena, mas grandes diferenças podem ocorrer em conjuntos de dados específicos.

O Modelo 03, por outro lado, apresentou um valor p inferior ao nível de significância estabelecido, rejeitando a hipótese nula de um bom ajuste do modelo. Neste caso, a agregação desses dois níveis acaba trazendo prejuízos em relação ao ajuste do modelo. As diferenças óbvias em termos de consequência das lesões desses dois níveis para o pedestre e o fato dos modelos com esses níveis separados apresentarem um ajuste melhor reforçam que a influência dos fatores de risco sobre esses dois níveis devem ser analisadas de forma distintas.

A Tabela 5 apresenta ainda os valores obtidos para o R^2 de McFadden e AIC de cada modelo. O R^2 de McFadden é limitado entre 0 e 1 e mede alterações nas funções de probabilidade, mas não tem uma interpretação óbvia quando analisado isoladamente. Por outro lado, ele pode ser usado para comparar o desempenho entre modelos, com valores mais próximos de 1 associados a uma superioridade do modelo. O Modelo 01 e o Modelo 02 apresentaram valores que indicam um bom ajuste para o modelo, mas o Modelo 02 apresentou o maior R^2 . Vale ressaltar também que o R^2 tende a aumentar com o aumento do número de variáveis preditoras, e o Modelo 02, mesmo com o menor número de variáveis explicativas, ainda apresentou melhor desempenho.

O AIC é uma medida de ajuste, baseada na verossimilhança. Valores menores do AIC são preferíveis, contudo, é importante destacar que a medida penaliza o modelo por ter um grande número de parâmetros (GREENE e HENSHER, 2010). O Modelo 02 obteve o maior valor do logaritmo da verossimilhança. Mesmo com a penalização, o Modelo 01, que tem uma variável explicativa a mais que o Modelo 03, apresentou um AIC bem próximo ao do terceiro modelo. Já o Modelo 02 com a diferença de apenas uma variável preditora em relação ao Modelo 03 e duas variáveis em relação ao Modelo 01, apresentou um AIC bem menor. Isso demonstra que essa diferença não se deve somente pela penalização imposta pela medida, mas também por um melhor ajuste do Modelo 02.

Como já mencionado, o modelo logit multinomial tem como pressuposto a Independência das Alternativas Irrelevantes. Para verificar se os modelos estimados neste estudo atendem essa premissa foi realizado o teste de Hausman-McFadden. Cada um dos três modelos testados foi comparado a um modelo estimado com um subconjunto do grupo de categorias da variável dependente. Os resultados sugeriram que a premissa da IAI foi atendida.

A agregação dos níveis leve e moderado não gerou grandes mudanças nos parâmetros estimados das categorias grave e fatal em relação a categoria de referência, quando se compara os modelos 01 e 02. Nesse sentido, problemas relacionados a possíveis inconsistências na classificação de uma lesão entre os níveis leve e moderado, devido à proximidade em termos de consequência da lesão, poderiam ser minimizados com a união dessas categorias sem perda na qualidade do modelo. Levando-se em consideração os testes realizados e as métricas consideradas para a comparação entre os três modelos, o Modelo 02 com três níveis de severidade (leve/moderado, grave e fatal) apresentou o melhor desempenho. Esses três níveis serão utilizados nas análises posteriores desse trabalho.

4.3 Heterogeneidade não-observada

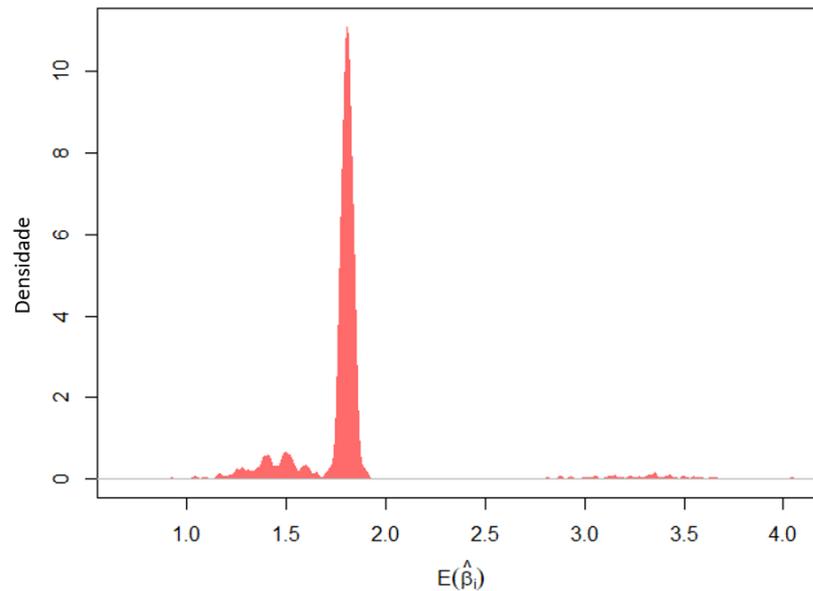
Os modelos de parâmetros aleatórios ou modelos logit mistos têm como principais vantagens sobre os modelos multinomiais tradicionais o fato de não estarem condicionados à premissa de IAI e permitem incorporar uma possível heterogeneidade no efeito das variáveis independentes sobre a severidade devido a fatores não observados. As estimativas para o modelo de parâmetros aleatórios são apresentadas na Tabela 6. A variável resposta foi definida pelo arranjo do Modelo 02, apresentado anteriormente, com os níveis *leve* e *moderado* unidos em uma única categoria.

Dos fatores investigados apenas a variável referente ao grupo de pedestres com idade superior a 60 anos obteve um parâmetro aleatório estatisticamente significativo a um nível de confiança de 90%, ou seja, tanto a média quanto o desvio padrão da distribuição do parâmetro foi significativamente diferente de zero. A variável *Ida_M60* apresentou um parâmetro aleatório normalmente distribuído com média 1,81 e desvio padrão de 1,65 para a categoria fatal. A Figura 10 apresenta a distribuição dos parâmetros estimados para essa variável. É possível observar que 100% da distribuição é maior que zero, indicando que de fato esse grupo de pedestres está sujeito a um risco maior de lesões fatais quando envolvido num acidente. A heterogeneidade nas observações pode estar associada neste caso, entre outros fatores, à fragilidade física do corpo e a função cognitiva que pode diferir entre os indivíduos desse grupo. Um pedestre de 61 anos pode ter uma resistência maior ao impacto ou um tempo de reação maior que um pedestre de 85 anos, por exemplo.

Tabela 6: Resultados da estimativa do modelo de parâmetros aleatórios

<i>Random Parameters</i>				
	<i>Grave</i>		<i>Fatal</i>	
	<i>coef</i>	<i>valor p</i>	<i>coef</i>	<i>valor p</i>
<i>Intercepto</i>	-2,802	0,000	-5,494	0,000
<i>Sexo</i>	0,059	0,664	0,636	0,002
<i>Ida_31_60</i>	0,226	0,125	0,942	0,000
<i>Ida_M60</i>	0,063	0,754	1,808	0,001
<i>sd(Ida_M60)</i>			1,653	0,062
<i>Sexo_C</i>	-0,053	0,752	0,574	0,034
<i>FDS</i>	0,326	0,015	0,447	0,015
<i>Noite</i>	0,507	0,000	0,595	0,001
<i>Veic_Pes</i>	0,949	0,000	1,496	0,000
<i>v_exp</i>	1,491	0,000	1,700	0,000
<i>v_art</i>	0,426	0,006	0,722	0,001
<i>v_col</i>	0,449	0,020	0,327	0,241
<i>P_SEM</i>	-0,300	0,046	-0,061	0,747
<i>Log Likelihood at convergence</i>	-1.540,4			
<i>Log Likelihood at zero</i>	-2.922,3			
<i>Pseudo R²</i>	0,47			
<i>AIC</i>	3.130,75			

Figura 10: Distribuição do parâmetro - Ida_M60



Fonte: elaborado pelo autor

Comparando o modelo logit multinomial tradicional ao modelo logit de parâmetros aleatórios, observou-se que, em termos de qualidade de ajuste, os modelos

apresentaram desempenho semelhante. O valor médio do parâmetro estimado pelo modelo de parâmetros aleatórios para a variável *Ida_M60* é ligeiramente maior que o valor do parâmetro estimado pelo modelo tradicional. Além disso, o sinal para toda a distribuição do parâmetro aleatório é o mesmo. Nesse sentido, a principal vantagem do modelo de parâmetros aleatórios é fornecer uma interpretação mais precisa dos efeitos das variáveis sobre a gravidade das lesões dos pedestres, capturando a heterogeneidade das observações. A partir dos sinais dos coeficientes é possível obter informações sobre a direção do efeito das variáveis sobre a severidade, uma vez que um sinal positivo indica um aumento na probabilidade de um nível em relação a categoria base.

Das características dos pedestres analisadas a variável *Sexo* foi significativa apenas para a categoria fatal, com um coeficiente positivo. Isso equivale a dizer que pedestres do sexo masculino tem maiores chances de sofrerem lesões fatais quando envolvidos em um acidente de trânsito em relação a pedestres do sexo feminino. Uma hipótese para este resultado pode estar relacionada a uma tendência de um comportamento mais arriscado por parte dos homens, especialmente em relação às brechas disponíveis para travessia. É possível que as mulheres tenham um padrão de mobilidade diferente de homens, em termos de aceitação de risco ou exposição à acidentes (Rosenbloom, 2009; Dutta e Vasudevan, 2017). No caso de Fortaleza, Torres *et al.* (2020) observaram que os homens tendem a realizar travessias mais agressivas/arriscadas do que as mulheres em travessias no meio de quadra. Além disso, este resultado é consistente com estudos anteriores que demonstraram que homens e mulheres sofrem acidentes de forma diferente (Bose *et al.*, 2011; Evans 2001).

Quanto a idade dos pedestres, além do grupo com idade acima de 60 anos cujo parâmetro aleatório foi significativo, a variável referente ao grupo com idade entre 31 e 60 anos obteve um parâmetro fixo significativo para a categoria fatal. O sinal positivo dessa variável também indica um aumento na probabilidade de lesões fatais para esse grupo em relação a jovens com idade entre 16 e 30 anos.

Condutores do sexo masculino estão também associados a maiores probabilidades de estarem envolvidos em acidentes com lesões fatais nos pedestres, dado o sinal positivo do parâmetro da variável *Sexo_C*. Eluru, Bhat e Hensher (2008) e Kim *et al.* (2008) apontam que esse resultado pode ter uma relação com um maior comportamento de risco, para assumir maiores velocidades, desse grupo de condutores em comparação com condutores do sexo feminino. De acordo com dados da Polícia Rodoviária Federal, no ano de 2019, dos acidentes

ocorridos nas rodovias que atravessam o perímetro urbano de Fortaleza e cuja causa principal foi a velocidade incompatível, 85% envolviam condutores do sexo masculino.

Em relação aos aspectos ligados ao acidente tanto o dia da semana quanto o período do dia (dia ou noite) do acidente foram significativos e revelaram que há maiores chances de vítimas graves ou fatais em atropelamentos ocorridos nos finais de semana e à noite. Na área urbana de Fortaleza, esses achados devem estar associados ao fluxo de tráfego consideravelmente menor que leva a maiores chances de eventos onde a velocidade do veículo era simplesmente muito alta para o corpo do pedestre, mesmo que (alguns deles) abaixo ou próximos ao limite de velocidade da via. Além disso, esses eventos de alta energia também podem ser resultado, pelo menos em parte, da escolha inadequada de velocidade feita por motoristas sob a influência de substâncias, bem como respostas tardias causadas por sua condição prejudicada ou devido às condições de visibilidade mais baixa no período da noite. Resultados semelhantes foram verificados nos trabalhos de Jang *et al.* (2013), Chen e Fan (2019), Zafri *et al.* (2020) e Batouli *et al.* (2020).

A classe funcional da via é comumente usada como uma variável *proxy* para a velocidade média dos veículos envolvidos. Embora o Código de Trânsito Brasileiro estabeleça um limite de 80km/h para as vias expressas, em Fortaleza o limite de 60km/h é adotado para essas vias, bem como para as vias arteriais. De acordo com a Tabela 6, tanto as vias arteriais quanto as vias expressas estão associadas a um maior risco de lesões graves e fatais aos pedestres, o que é atribuído notadamente às velocidades mais altas alcançadas pelos motoristas. No entanto, é importante observar que nessas vias a presença de veículos pesados, principalmente de carga, também é mais comum e a combinação desses dois fatores pode aumentar ainda mais esse risco.

A variável *Veic_Pes* (veículos pesados), que inclui caminhões, caminhonetes e ônibus, influencia significativamente a severidade das lesões, aumentando as chances de lesões mais severas no pedestre. Essa relação foi encontrada em estudos anteriores como os de Wang *et al.* (2013) e Aziz *et al.* (2013).

O sinal negativo do coeficiente da variável *P_SEM* aponta que a presença de semáforos próximos ao local do acidente reduz as chances de lesões graves nos pedestres. Aziz, Ukkusuri e Hasan (2013) e Sze e Wong (2007) obtiveram resultados semelhantes em seus trabalhos. Os autores atribuem esses resultados a melhor indicação de prioridade em

locais com controle de tráfego o que leva a uma maior cautela tanto dos condutores quanto dos pedestres.

Embora se acreditasse que a idade do condutor pudesse representar diferentes comportamentos de risco que afetariam a escolha das velocidades atingidas e indiretamente os resultados das lesões, como apontado em outros estudos, essa relação não foi estatisticamente significativa. Logo, não se pode afirmar que há diferenças nos resultados das lesões a depender da idade do condutor. É importante destacar, no entanto, que o comportamento de risco desses usuários pode estar refletido ainda nas variáveis relacionadas ao dia da semana e ao período noturno.

A presença de dispositivos de fiscalização eletrônica que poderiam condicionar o motorista aos limites de velocidades estabelecidos, também não demonstraram influência sobre nenhum nível de severidade. Esse resultado pode estar associado ao fato de que apesar dos motoristas trafegarem no limite de velocidade estabelecido ou um pouco abaixo, essa velocidade permitida ainda é considerada alta (se considerado por exemplo um limite de 60km/h) em relação a energia transferida ao pedestre durante o impacto do atropelamento, o que pode resultar em lesões mais severas nesses usuários. Nesse sentido, o modelo não consegue capturar o efeito desses dispositivos na severidade dos atropelamentos.

Os efeitos parciais das variáveis *dummy* nas três categorias de severidade podem ser avaliados comparando-se as probabilidades estimadas para um cenário de referência e um novo cenário em que apenas uma variável é modificada, procedimento também denominado de pseudoelasticidade. Nesse trabalho, o cenário de referência foi configurado da seguinte maneira:

Tabela 7: Cenário referência

	<i>Característica</i>
<i>Sexo</i>	Mulher
<i>Ida_31_60</i>	Idade entre 16 e 30 anos
<i>Ida_M60</i>	
<i>Sexo_C</i>	Mulher
<i>FDS</i>	Entre segunda-feira e sexta-feira
<i>Noite</i>	Entre 5hrs e 18hrs
<i>Veic_Pes</i>	Automóvel de passeio
<i>v_exp</i>	
<i>v_art</i>	Via local
<i>v_col</i>	
<i>P_SEM</i>	Presença de semáforos no entorno do local

Os resultados da Tabela 8 obtidos a partir do modelo de parâmetros aleatórios (Tabela 6) fornecem informações úteis para comparar a influência de diferentes variáveis em diferentes categorias de gravidade.

Tabela 8: Pseudoelasticidade

	<i>Leve/Mod</i>	<i>Grave</i>	<i>Fatal</i>
<i>Sexo</i>	0%	-	88%
<i>Ida_31_60</i>	-1%	-	155%
<i>Ida_M60</i>	-2%	-	498%
<i>Ida_M60 + 1 desv. Padrão</i>	-11%	-	2.746%
<i>Ida_M60 - 1 desv. Padrão</i>	0%	-	17%
<i>Sexo_C</i>	0%	-	77%
<i>FDS</i>	-2%	35%	53%
<i>Noite</i>	-4%	59%	74%
<i>Veic_Pes</i>	-9%	134%	304%
<i>v_exp</i>	-18%	266%	351%
<i>v_art</i>	-3%	48%	99%
<i>v_col</i>	-3%	52%	-
<i>P_SEM</i>	2%	-25%	-

- não significativo para um nível de confiança de 0,10

Quando comparado ao cenário referência os homens têm em torno de 88% a mais de chance de sofrerem lesões fatais em relação às mulheres. Quanto as consequências das lesões com a idade, pedestres com idade entre 31 e 60 anos são 155% mais prováveis de sofrerem lesões fatais em um atropelamento em comparação a jovens com idade entre 16 e 30 anos. Os resultados fornecidos pela estimativa do modelo sugeriram a existência de heterogeneidade não observada na variável *Ida_M60*, que apresentou um parâmetro normalmente distribuído com desvio padrão de 1,65 para a categoria fatal. Neste caso, modificando o cenário referência ao adicionar mais um e menos um desvio padrão ao valor do parâmetro da média, as chances de pedestres com idade acima de 60 anos sofrerem lesões fatais variam entre 17% e 2.746% a mais do que pedestres mais jovens.

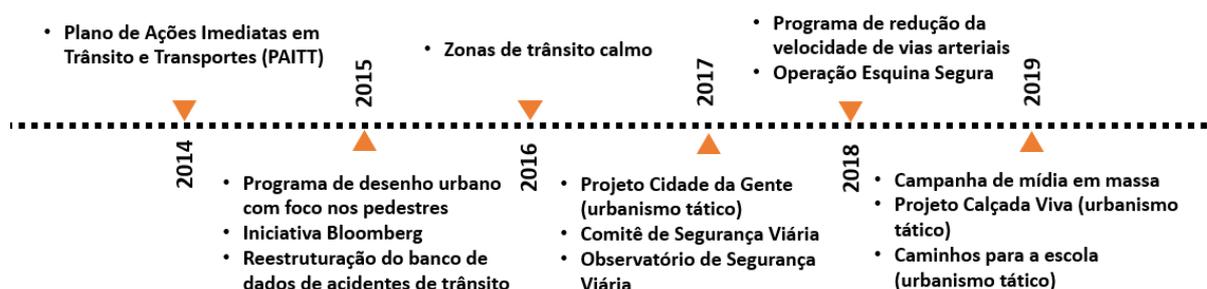
Condutores do sexo masculino tem 77% de chances a mais de estarem envolvidos em acidentes em que os pedestres foram vítimas fatais em comparação a condutores do sexo feminino. A probabilidade de lesões graves e fatais no pedestre é 35% e 53% maior, respectivamente, em um acidente ocorrido no final de semana quando comparado a um acidente em um dia útil da semana. Já o período da noite aumenta em 59% e 74% as chances de lesões graves e fatais.

Um atropelamento envolvendo um veículo pesado tem cerca de 4 vezes mais chances de ter como consequência a fatalidade do pedestre. Vias expressas e arteriais como mostrado estão associadas a uma maior probabilidade de lesões mais severas no pedestre. Quando comparado ao cenário de referência as vias expressas aumentam em cerca de 4,5 vezes as chances de lesões fatais, enquanto as vias arteriais aumentam em quase 2 vezes essas chances. Atropelamentos em vias coletoras, por outro lado, tem pelo menos 52% a mais de chances de ocasionarem lesões graves no pedestre em relação às vias locais. A presença de semáforos no entorno do local do acidente está associada a uma redução de 25% nas chances de lesões graves.

4.4 Análise Temporal

De acordo com a abordagem dos Sistemas Seguros os homens são suscetíveis a cometerem erros no trânsito, todavia o sistema viário deve ser capaz de evitar que esses erros levem a um desfecho grave ou fatal em caso de acidentes. Mudanças no comportamento dos usuários como também intervenções no sistema viário podem produzir alterações na frequência dos acidentes assim como no nível de gravidade das lesões. A cidade de Fortaleza, nos últimos anos, promoveu uma série de ações e intervenções de melhoria na segurança viária com foco especial no gerenciamento da velocidade no trânsito (Figura 11). Tais iniciativas podem modificar o perfil da severidade das lesões, bem como alterar a forma como os fatores de risco influenciam no resultado dessas lesões.

Figura 11: Marcos do Gerenciamento de velocidade em Fortaleza

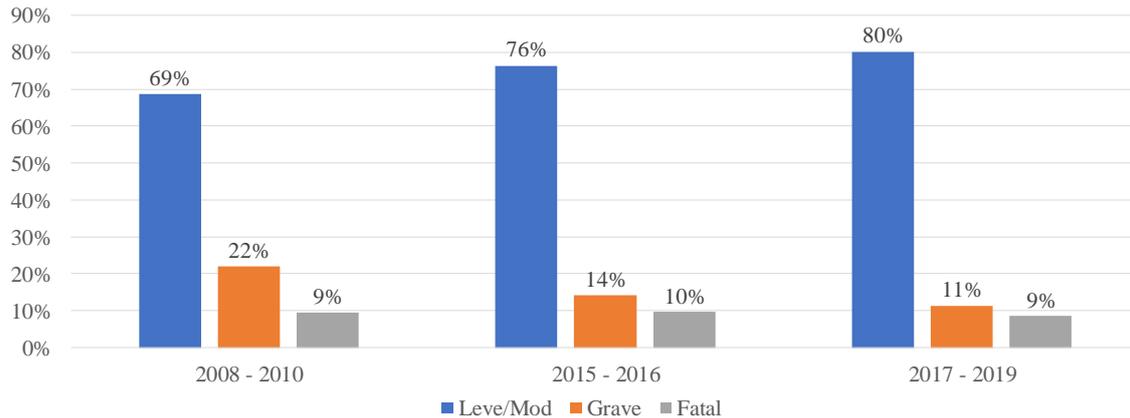


Fonte: elaborado pelo autor

Esse trabalho se propõe a analisar de forma empírica a relação entre essas ações e intervenções no sistema viário e a mudança no perfil da severidade das lesões de pedestres envolvidos em acidentes de trânsito entre os anos de 2008 e 2019. Para isso, esses anos foram divididos em três períodos específicos. A Figura 12 apresenta a distribuição de frequência de

cada nível de severidade para os três períodos analisados, considerando apenas as observações com todas as informações necessárias para este estudo. De antemão, é possível observar visualmente um aumento expressivo na proporção de pedestres que sofreram apenas lesões leves a moderadas, assim como uma redução na proporção de vítimas com lesões graves. Já a proporção de vítimas fatais parece seguir uma tendência de estabilidade ao longo do tempo.

Figura 12: Distribuição de frequência da severidade por período.



O resultado das lesões como discutido anteriormente é influenciado por uma série de fatores de risco. Essa variação na distribuição de frequência pode ser apenas uma variação aleatória dos dados e dessa forma não significativa em termos de melhoria da segurança viária para o pedestre, como também pode estar associada a uma mudança na forma como esses fatores de risco influenciam na severidade. No primeiro caso, para verificar se essa mudança é de fato significativa estimou-se um modelo multinomial não ordenado tradicional a partir das observações dos três períodos, considerando, além dos fatores de risco já investigados, o fator tempo (período de ocorrência do acidente) como uma variável explicativa. Para isso, foram criadas duas variáveis *dummy* relativas ao segundo e ao terceiro período e tendo como referência o primeiro período. Os resultados desse modelo são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9: Estimativa dos parâmetros para o fator tempo

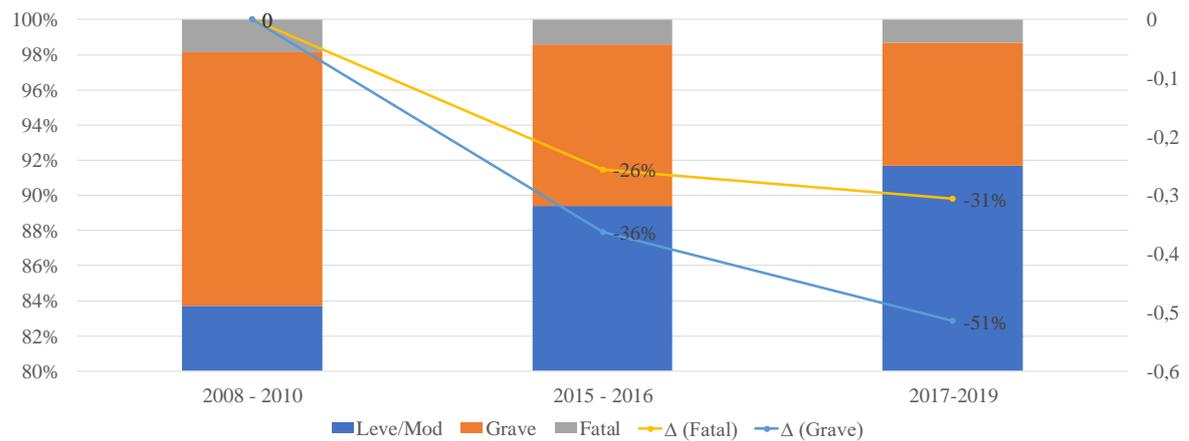
	<i>Grave</i>		<i>Fatal</i>	
	Coef	valor p	coef	valor p
<i>const</i>	-1,757	0,000	-3,805	0,000
<i>Periodo2</i>	-0,516	0,000	-0,361	0,002
<i>Periodo3</i>	-0,813	0,000	-0,456	0,000
<i>Sexo</i>	0,150	0,046	0,219	0,024
<i>Ida_0_15</i>	0,063	0,642*	0,553	0,027
<i>Ida_31_60</i>	0,262	0,005	1,151	0,000
<i>Ida_M60</i>	0,381	0,001	2,314	0,000
<i>FDS</i>	0,143	0,057	0,272	0,005
<i>Noite</i>	0,262	0,000	0,385	0,000
<i>Veic_Pes</i>	0,685	0,000	1,083	0,000
<i>Moto</i>	0,007	0,927*	-0,178	0,078
<i>V_Art</i>	0,043	0,621*	0,273	0,012
<i>V_Exp</i>	0,858	0,000	1,062	0,000
<i>P_SEM</i>	-0,261	0,008	0,069	0,542*
<i>P_EQUI_FE</i>	0,093	0,399*	-0,299	0,053

*não significativo para um nível de confiança de 0,10

Analisando apenas o fator tempo observa-se que as variáveis referentes ao período 2 (2015 a 2016) e ao período 3 (2017 a 2019) foram significativas tanto para a categoria grave quanto para a categoria fatal. Isso pode ser um indicativo de que as mudanças nesses níveis de severidade em relação ao nível base (leve/moderado) foram significativas em relação ao primeiro período. O sinal negativo em ambas as variáveis indica uma redução nas probabilidades de lesões graves e fatais em relação às lesões leves/moderadas, tanto para o segundo quanto para o terceiro período.

Para se ter uma ideia da magnitude dessa redução, considere um acidente hipotético com as seguintes características: pedestre do sexo feminino, com idade entre 16 e 30 anos, ocorrido durante um dia útil, no período diurno, envolvendo um automóvel de passeio e em um local sem a presença de semáforos ou de câmeras de fiscalização eletrônica. O gráfico da Figura 13 ilustra as probabilidades previstas de cada nível de severidade, obtidas a partir do modelo da Tabela 9, assumindo que esse mesmo acidente hipotético ocorresse nos três períodos.

Figura 13: Variação nas probabilidades previstas com o tempo em um acidente hipotético



Da Figura 13 é possível observar que para as mesmas características um atropelamento no período 2 tem 26% e 36% de chances a menos de resultarem em lesões graves e fatais, respectivamente, quando comparado a um acidente ocorrido no período 1. Já para o período 3 essa redução é de 31% para as chances de lesões graves e de 51% para lesões fatais em relação ao período 1.

Para avaliar essa variação temporal dos fatores de risco uma outra abordagem foi utilizada. Foram estimados modelos multinomiais não ordenados tradicionais para cada um dos três períodos. Os modelos são apresentados na Tabela 11. Contudo, antes de avaliar os resultados, uma série de testes de verossimilhança foi aplicada para testar o modelo quanto à estabilidade temporal dos parâmetros estimados. A Tabela 10 mostra os resultados do teste. Para esse teste a hipótese nula é que os coeficientes são transferíveis entre os períodos. Primeiro estimou-se um modelo para dois períodos consecutivos juntos. Em seguida foram estimados modelos para os períodos individualmente, mas restringindo os parâmetros a serem os mesmos do modelo geral e por fim foi calculado a estatística de teste da Equação 15.

Tabela 10: Testes de verossimilhança para diferentes anos.

Período	$LL(m_i + m_{i+1})$	k	$LL(m_i)$	$LL(m_{i+1})$	X^2	gl	valor p
1 – 2	-2.923,648	16	-1.584,344	-1.291,99	94,626	11	0,001
2 – 3	-2.857,122	16	-1.291,991	-1.546,18	37,894	12	0,002

Para um nível de significância de 0,10, os resultados indicam evidências para rejeitar a hipótese nula nas duas situações analisadas, o que demonstra uma instabilidade dos parâmetros entre os modelos. É impossível determinar se essa instabilidade temporal é o resultado de alguma evolução subjacente da influência de fatores que afetam as lesões nos

pedestres, ou o resultado de mudanças induzidas pelas ações e intervenções que ocorreram na cidade. No entanto, as diferenças significativas entre os modelos dos três períodos sugerem que o efeito das variáveis explicativas sobre os resultados das lesões mudou permanentemente ao longo do período estudado.

Analisando mais especificamente os três modelos estimados na Tabela 11, observa-se que as variáveis *Ida_31_60*, *Ida_M60*, *Veic_Pes* e *Via_Exp* foram significativas para os três períodos em pelo menos uma categoria. Além disso, não houve mudanças na direção do efeito da variável sobre a severidade, ou seja, o sinal do parâmetro permaneceu o mesmo nos três modelos. Contudo, os parâmetros significativos são ligeiramente diferentes entre os modelos.

Para avaliar como o efeito de cada um desses fatores variaram ao longo do período analisado, foram calculadas as probabilidades previstas para cada nível de severidade assumindo um acidente hipotético em que todas as variáveis recebem o valor zero, exceto a variável de interesse. Esse mesmo cenário foi utilizado nos três diferentes modelos. As Figuras 14 e 15 apresentam as probabilidades previstas para esses fatores em cada período e a variação percentual dos dois últimos períodos em relação aos anos de 2008 a 2010.

Figura 14: Variação nas probabilidades previstas para os fatores *Ida_31_60* e *Ida_M60*

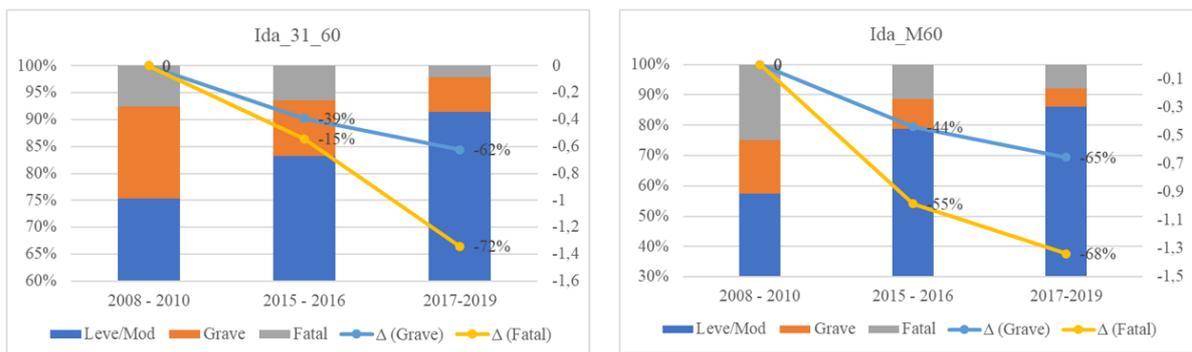
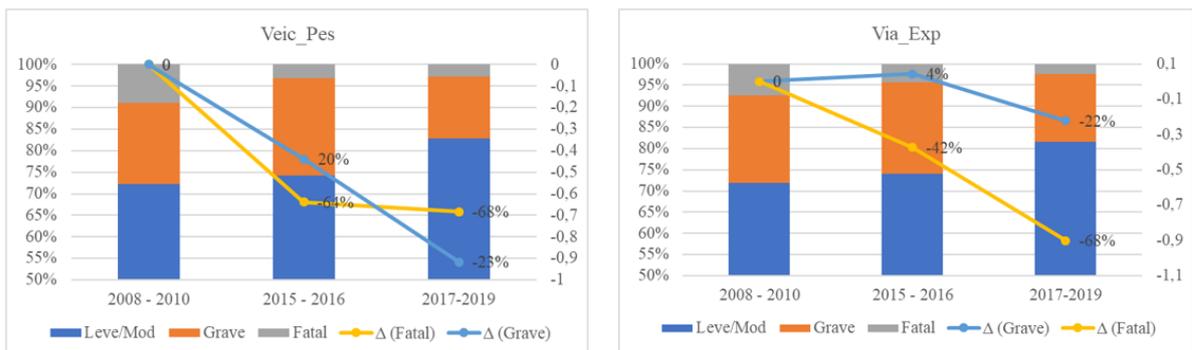


Figura 15: Variação nas probabilidades previstas para os fatores *Veic_Pes* e *Via_Exp*



No tocante à idade dos pedestres observa-se uma redução na probabilidade tanto das lesões graves quanto das lesões fatais. Essa redução é mais expressiva no terceiro período em relação ao primeiro, principalmente para as lesões graves. Tomando como exemplo os pedestres com idade acima de 60 anos, a probabilidade de um pedestre desse grupo sofrer uma lesão grave é 44% menor entre os anos de 2015 a 2016 e 65% menor entre os anos de 2017 a 2019. Já as chances de sofrerem lesões fatais são 55% e 68% menores no segundo e no terceiro período, respectivamente.

Um acidente envolvendo um veículo pesado e um pedestre é 68% menos provável de ter como resultado uma lesão fatal e 25% menos provável de resultar em lesão grave do pedestre nos três últimos anos analisados do que no período de 2008 a 2010. Já um acidente

em uma via expressa tem 68% de chances a menos de resultar em uma lesão fatal e 22% a menos de ter como resultado uma lesão grave no terceiro período quando comparado a um acidente com as mesmas características no primeiro período.

De maneira geral, é possível notar uma mudança no perfil da severidade das lesões em pedestres durante o período analisado. Apesar de não ter havido mudança na direção do efeito dos fatores de risco nos três períodos, alguns fatores não exerceram influência significativa sobre a severidade em todos períodos.

Algumas variáveis foram significativas apenas em períodos específicos como é o caso da variável *Sexo* que foi significativa no primeiro período para a categoria grave e no terceiro período para a categoria fatal. Em ambos os modelos o coeficiente apresentou sinal positivo indicando um aumento das chances dessas categorias de severidade quando o pedestre envolvido é do sexo masculino. A variável *Noite* por outro lado foi significativa no segundo e no terceiro período para os dois níveis de severidade, mantendo-se também o mesmo sinal dos coeficientes. As variáveis *Moto* e *P_EQUI_FE* foram significativas apenas no modelo referente ao período de 2008 a 2010. Já a variável *Ida_0_15* foi significativa para o modelo do segundo período, enquanto a variável *P_SEM* para o modelo do terceiro período.

Vale destacar que as variáveis *Ida_0_15*, *Moto* e *P_EQUI_FE* não apresentaram significância estatística nos modelos estimados nas etapas anteriores com os dados de 2017 a 2019 e dessa forma não haviam sido avaliados seus efeitos sobre a severidade. De acordo com os parâmetros estimados para o modelo do Período 2, pedestres com idade inferior a 15 anos (crianças) tem uma probabilidade maior de sofrerem lesões fatais quando comparado a pedestres com idade entre 16 e 30 anos (jovens). A pouca percepção de perigo no trânsito aliada ao menor tempo de reação desse grupo de pedestre tem o potencial de aumentar o risco de acidentes envolvendo esse grupo de pedestres. Por outro lado, o resultado das lesões em caso de acidentes pode estar associado principalmente a fragilidade do corpo em relação ao impacto e a altura desses usuários, que a depender do tipo de veículo envolvidas regiões do corpo mais sensíveis à transferência de energia podem ser facilmente atingidas.

Conforme os resultados do modelo para o Período 1, atropelamentos envolvendo motocicletas têm menores chances de resultarem em lesões fatais no pedestre quando comparado ao envolvimento de automóveis de passeio. Tal fato pode ser explicado principalmente pela menor massa das motocicletas, que implica numa menor energia

transferida ao pedestre durante o impacto. Já locais com a presença de equipamentos de fiscalização eletrônica estão associados a uma redução nas chances de lesões fatais. Isso se deve provavelmente a um melhor controle das velocidades atingidas pelos condutores.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 Conclusões

Este estudo apresentou uma análise sobre fatores de risco associados à severidade de acidentes com pedestres, considerando diferentes agregações dos níveis de severidade, a influência de uma possível heterogeneidade não observada nos fatores e avaliando possíveis variações temporais durante a década de ação pela segurança no trânsito na cidade de Fortaleza.

A partir da revisão da literatura foi proposto um modelo teórico para representar as relações entre os principais fatores de risco que pudessem influenciar no resultado das lesões. Foram investigadas variáveis relacionadas ao pedestre, ao condutor, ao momento do acidente e aspectos da rede viária. Para confirmar essas relações foram estimados modelos categóricos multinomiais com diferentes arranjos da variável resposta. Para tanto, utilizou-se uma amostra com 2.660 observações de acidentes com pedestres coletadas do Sistema de Informação de Acidentes de Trânsito de Fortaleza (SIAT-FOR) para os anos de 2017 a 2019.

A maioria das relações estabelecidas no modelo teórico foram reforçadas e confirmadas nos modelos categóricos propostos. Dos fatores investigados, somente as variáveis referentes à idade do condutor, à presença de fiscalização eletrônica próximo ao local do acidente e horário de pico não foram significativas em nenhum dos modelos analisados. Estas variáveis foram removidas dos modelos estimados.

Os três modelos estimados foram comparados com o intuito de verificar a influência das diferentes classificações na modelagem. A análise comparativa entre as três configurações da variável dependente (gravidade das lesões) mostrou que as variáveis, de fato, tiveram efeitos distintos nos diferentes níveis de gravidade e, portanto, a combinação de alguns níveis de gravidade poderia resultar em variáveis significativas diferentes. Assim, dependendo da especificação da variável resposta, a influência de alguns fatores de risco importantes pode acabar sendo ignorada no modelo.

Por outro lado, ao definir um critério para seleção de um modelo de avaliação dos fatores de risco com base no melhor ajuste, os resultados mostraram que o modelo com os níveis de gravidade leve e moderada reunidos em uma única categoria além dos níveis grave e fatal em categorias diferentes melhorou o ajuste do modelo, ao contrário do modelo que uniu os níveis grave e fatal em uma única categoria. Possíveis limitações relacionadas à

classificação incorreta entre esses dois níveis poderiam ser minimizadas unindo esses dois níveis sem prejuízo da qualidade do modelo.

Para avaliar os efeitos dos fatores de risco na gravidade das lesões foi utilizada uma outra abordagem de modelagem categórica denominada de modelos de parâmetros aleatórios. Uma série de modelos foram estimados testando-se cada variável como parâmetro aleatório até se chegar ao modelo final. Dos fatores investigados apenas a variável referente a idade superior a 60 anos do pedestre obteve um parâmetro aleatório significativo. As demais variáveis foram tratadas como parâmetros fixos.

Em relação ao modelo logit multinomial tradicional, observou-se que o modelo logit de parâmetros aleatórios apresentou desempenho semelhante em termos de qualidade de ajuste e também quanto a magnitude e sinal da média do parâmetro. Nesse sentido, destaca-se como principal vantagem do modelo de parâmetros aleatórios uma interpretação mais precisa dos efeitos das variáveis sobre a gravidade das lesões dos pedestres, capturando a heterogeneidade das observações.

As variáveis investigadas incluem aspectos dos pedestres, dos condutores, atributos da rede viária e aspectos do acidente. Em relação aos fatores humanos, foram investigados a idade e o sexo do pedestre e do motorista envolvido. O modelo estimado sugeriu que pedestres idosos (acima de 60 anos) têm em média 6 vezes mais chances de sofrerem lesões fatais em acidentes de trânsito em comparação com pedestres jovens (com idade entre 16 e 30 anos). A idade do motorista, por outro lado, não apresentou significância estatística para o resultado das lesões. Quanto ao sexo, tanto os motoristas quanto os pedestres do sexo masculino têm uma maior probabilidade de estarem envolvidos em atropelamentos com consequências fatais para o pedestre.

O período do dia (dia / noite), bem como o dia da semana tiveram uma influência significativa no resultado do acidente. Um atropelamento à noite está associado a maiores chances de ferimentos graves aos pedestres. Também existe uma diferença na probabilidade de acidentes ocorridos nos dias úteis e nos finais de semana, sendo os acidentes nos finais de semana os responsáveis por uma maior probabilidade de lesões fatais.

Alguns atributos operacionais da rede viária também foram investigados, como a presença de radares e de semáforos no entorno do local do acidente. Os resultados indicaram que os semáforos reduzem as chances de ferimentos graves aos pedestres. Esse resultado é de

certa forma intuitivo já que se espera que os semáforos aumentem a cautela dos motoristas e pedestres. Por outro lado, a variável relacionada à presença de fiscalização eletrônica não foi significativa.

Em relação aos automóveis de passeio, os veículos pesados, como ônibus, caminhões, vans, entre outros, estão associados a uma maior probabilidade de acidentes com pedestres. Além da massa, que tem efeito decisivo na energia transferida durante o impacto, a rigidez e a forma desses veículos maiores também estão relacionadas à concentração de energia que é transferida e de certa forma pela área afetada do corpo da vítima com o impacto. Além disso, vias com classificação mais alta, como vias expressas ou arteriais, caracterizadas por terem faixas mais largas e em maior número, mostraram estar associadas a uma maior probabilidade de acidentes mais graves com pedestres. Vale ressaltar que em 2018 a cidade de Fortaleza iniciou um processo de adequação dos limites de velocidade de algumas vias arteriais de 60 para 50km/h.

Como último objetivo específico desse trabalho buscou-se avaliar a influência desses fatores de risco ao longo do tempo, mais especificamente entre os anos de 2008 e 2019. Para tanto, esse intervalo de tempo foi dividido em três períodos. Duas abordagens de modelagem categórica foram utilizadas: na primeira um único modelo foi estimado e o tempo (período) foi incluindo como uma variável explicativa; já na segunda estimou-se um modelo para cada período.

Os resultados da primeira abordagem demonstraram significância estatística para a variável referente ao tempo e o sinal do parâmetro estimado indicou uma redução na probabilidade de lesões graves e fatais nos dois últimos períodos em relação ao primeiro período. Da segunda abordagem, observou-se que algumas variáveis foram significativas apenas em períodos específicos, como o sexo do pedestre e a presença de fiscalização eletrônica. Por outro lado, outras variáveis como idade acima de 60 anos do pedestre, veículos pesados e vias expressas, mantiveram-se significativas nos três modelos, com o sinal do parâmetro igual, indicando que a direção do efeito destas sobre a severidade não mudou. De maneira geral, notou-se que um acidente com as mesmas características tem uma probabilidade bem menor de resultar em lesões graves e fatais no pedestre no último período analisado.

A partir dessa análise fica evidente uma mudança no perfil da severidade dos acidentes envolvendo pedestres na cidade de Fortaleza ao longo desses 12 anos. Apesar de não ser possível afirmar que essa mudança advém de ações específicas aplicadas à cidade, os resultados aqui apresentados indicam uma melhoria na segurança viária para esses usuários, em consonância com os objetivos da Abordagem dos Sistemas Seguros e da Década de Ação pela Segurança no Trânsito de reduzir as lesões graves e fatais no trânsito. Tendo em vista que a velocidade dos veículos no momento do impacto é um dos fatores determinantes no resultado das lesões do pedestre, pode-se atribuir a essas iniciativas com foco no gerenciamento da velocidade nas vias de Fortaleza, em grande parte, a responsabilidade, por essa mudança no perfil da severidade dos acidentes.

5.2 Limitações e Recomendações

Existem algumas limitações para o presente trabalho que também devem ser mencionadas. A primeira delas refere-se ao banco de dados. As informações referentes aos acidentes de trânsito de Fortaleza são provenientes de diversas fontes e são consolidadas pelos técnicos da AMC. Entretanto, nem sempre os técnicos conseguem todas as informações sobre o evento o que acaba reduzindo o número de observações com dados necessários para a realização de estudos como este. Esse problema, por exemplo, levou a exclusão do período de 2011 a 2014 da análise temporal proposta nesse trabalho.

A segunda limitação refere-se aos fatores de risco analisados. Como bem evidenciado na revisão da literatura, a velocidade dos veículos é um fator determinante no resultado das lesões nos pedestres, porém é uma informação que dificilmente estará disponível nos bancos de dados de acidentes. A influência potencial da velocidade como fator foi inferida indiretamente usando o horário do dia, dia da semana e classificação da via como variáveis *proxy*. Embora seja desafiador capturar velocidades de veículos individuais para cada ocorrência, em trabalhos futuros pode ser possível usar uma variável mais informativa, como a velocidade média do fluxo de tráfego obtida tanto de dados históricos de detectores de loop quanto por simulação micro e mesoscópica.

Os acidentes de trânsito que se distribuem no espaço viário são resultados da interação das atividades humanas, com os diversos contextos culturais, socioeconômicos e geográficos. Alguns fatores que têm influências significativas nas lesões de pedestres podem

provavelmente estar relacionados ao espaço, e essas variáveis podem também não ser observadas ou disponibilizadas nos bancos de dados de acidentes, causando o que se definiu anteriormente como heterogeneidade não observada, mais especificamente heterogeneidade espacial não observada. Em estudos futuros recomenda-se explorar técnicas estatísticas, como a modelagem espacial, que é uma abordagem analítica promissora que pode capturar a heterogeneidade não observada que se relaciona com o domínio do espaço. Alguns estudos recentes já vêm aplicando modelos de regressão logística ordenada ponderada geograficamente na análise da severidade de acidentes (Liu *et al.*, 2019; Liu *et al.*, 2020; Xu *et al.*, 2020).

REFERÊNCIAS

- ABAY, K. A. Examining pedestrian-injury severity using alternative disaggregate models. **Research in Transportation Economics**, v. 43, n. 1, p. 123–136, 2013.
- AGRESTI, A. **An Introduction to Categorical Data Analysis**. 2.ed., New Jersey: Wiley, 2006.
- AL-GHAMDI, A. S. Pedestrian-vehicle crashes and analytical techniques for stratified contingency tables. **Accident Analysis and Prevention**, v. 34, n. 2, p. 205–214, 2002.
- ANDERSON, R.W.G.; MCLEAN, A.J; FARMER, M.J.B; LEE, B.H.; BROOKS, C.G. Vehicle Travel Speeds and The Incidence of Fatal Pedestrian Collisions. **Accident Analysis and Prevention**, v. 29, n. 5, p. 667–674, 1997.
- ALNAWMASI, N.; MANNERING, F. A statistical assessment of temporal instability in the factors determining motorcyclist injury severities. **Analytic Methods in Accident Research**, v. 22, p. 100090, 2019.
- AMC – AUTARQUIA MUNICIPAL DE TRÂNSITO E CIDADANIA. Relatório Anual de Segurança Viária de Fortaleza 2018. Fortaleza, 2018.
- AMOH-GYIMAH, R.; SABERI, M.; SARVI, M. Macroscopic modeling of pedestrian and bicycle crashes: A cross-comparison of estimation methods. **Accident Analysis and Prevention**, v. 93, p. 147–159, 2016.
- ASAITHAMBI, G.; KUTTAN, M. O.; CHANDRA, S. Pedestrian Road Crossing Behavior Under Mixed Traffic Conditions: A Comparative Study of an Intersection Before and After Implementing Control Measures. **Transportation in Developing Economies**, v. 2, n. 2, 2016.
- AZIZ, H. M. A.; UKKUSURI, S. V.; HASAN, S. Exploring the determinants of pedestrian-vehicle crash severity in New York City. **Accident Analysis and Prevention**, v. 50, p. 1298–1309, 2013.
- BATOULI, G.; GUO, M.; JANSON, B.; MARSHALL, W. Analysis of pedestrian-vehicle crash injury severity factors in Colorado 2006–2016. **Accident Analysis and Prevention**, v. 148, 2020.
- BELIN, M. A.; TILLGREN, P.; VEDUNG, E. Vision Zero—a road safety policy innovation. **International journal of injury control and safety promotion**, v. 19, n. 2, p. 171-179, 2012.
- BEHNOOD, A.; MANNERING, F. L. Time-of-day variations and temporal instability of factors affecting injury severities in large-truck crashes. **Analytic Methods in Accident Research**, v. 23, p. 100102, 2019.
- BEHNOOD, A.; MANNERING, F. L. An empirical assessment of the effects of economic recessions on pedestrian-injury crashes using mixed and latent-class models. **Analytic Methods in Accident Research**, v. 12, p. 1–17, 2016.

BEHNOOD, A.; MANNERING, F. L. The temporal stability of factors affecting driver-injury severities in single-vehicle crashes: Some empirical evidence. **Analytic Methods in Accident Research**, v. 8, p. 7–32, 2015.

BHAT, C.R.; ASTROZA, S.; LAVIERI, P. S. A new spatial and flexible multivariate random-coefficients model for the analysis of pedestrian injury counts by severity level. **Analytic Methods in Accident Research**, v. 16, p. 1–22, 2017.

BOSE D.; SEGUI-GOMEZ M.; CRANDALL JR. Vulnerability of female drivers involved in motor vehicle crashes: an analysis of us population at risk. **American Journal of Public Health**, v. 101, n. 12, p. 2368-2373, 2011.

BURDETT, B.; LI, Z.; BILL, A. R.; NOYCE, D.A; Accuracy of Injury Severity Ratings on Police Crash Reports. **Transportation Research Record**, v. 2516, p. 58–67, 2015.

CARVALHO, M. V. G. S. A. **Um modelo para dimensionamento de calçadas considerando o nível de satisfação do pedestre**. Tese. 2006 (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

CHEN, H.; CAO, L.; LOGAN, D. B. Analysis of Risk Factors Affecting the Severity of Intersection Crashes by Logistic Regression. **Traffic Injury Prevention**, v. 13, n. 3, p. 300–307, 2012.

CHEN, Z.; FAN, W. A multinomial logit model of pedestrian-vehicle crash severity in North Carolina. **International Journal of Transportation Science and Technology**, v. 8, n. 1, p. 43–52, 2019.

CLIFTON, K. J.; BURNIER, C. V.; AKAR, G. Severity of injury resulting from pedestrian-vehicle crashes: What can we learn from examining the built environment? **Transportation Research Part D: Transport and Environment**. v. 14, n. 6, p. 425–436, 2009.

CORBEN, B.; CAMERON, M.; SENSERRIK, T.; RECHNITZER, G. Development of the visionary research model: application to the car/pedestrian conflict. n. 229, 2005.

COUTINHO, C. H. L.; CUNTO, F. J. C.; FERREIRA, S. M. P. Análise da severidade dos acidentes com motocicletas utilizando modelos probit e logit ordenados. **Transportes**, v. 23, n. 4, p. 60, 2015.

COUTO, A.; AMORIM, M.; FERREIRA, S. Reporting road victims: Assessing and correcting data issues through distinct injury scales. **Journal of Safety Research**, v. 57, p. 39–45, 2016.

CRANDALL, J. R.; BHALLA, K. S.; MADELEY, N. J. Designing road vehicles for pedestrian protection. **British Medical Journal**, v. 324, n. 7346, p. 1145–1148, 2002.

CUNTO, F.J.C.; FERREIRA, S. An analysis of the injury severity of motorcycle crashes in Brazil using mixed ordered response models. **Journal of Transportation Safety and Security**, v. 9, p. 33–46, 2017.

DATASUS. Morbidade hospitalar do SUS por causas externas, 2018. Disponível em: <http://tabnet.datasus.gov.br/cgi/tabcgi.exe?sih/cnv/fiuf.def>. Acesso em 15 jul. 2020.

- ELURU, N.; BHAT, C. R.; HENSHER, D. A. A mixed generalized ordered response model for examining pedestrian and bicyclist injury severity level in traffic crashes. **Accident Analysis and Prevention**, v. 40, n. 3, p. 1033–1054, 2008.
- EUDALY, Chloe. Saving Lives With Safe Streets. City of Portland, Oregon.
- ELVIK, R.; MYSEN, A. B. Incomplete accident reporting: Meta-analysis of studies made in 13 countries. **Transportation Research Record**, n. 1665, p. 133–140, 1999.
- EVANS, L.. Female compared with male fatality risk from similar physical impacts. **Journal of Trauma and Acute Care Surgery**, v. 50, n. 2, p. 281-288, 2001.
- FAGERLAND, M. W.; HOSMER, D. W.; BOFIN, A. M. Multinomial goodness-of-fit tests for logistic regression models. **Statistics in Medicine**, v. 27, n. 21, p. 4238–4253, 2008.
- FERREIRA, S.; FALCÃO, L.; COUTO, A.; AMORIM, M. The quality of the injury severity classification by the police: An important step for a reliable assessment. **Safety Science**, v. 79, p. 88–93, 2015.
- GARDER, P. E. The impact of speed and other variables on pedestrian safety in Maine. **Accident Analysis and Prevention**, v. 36, n. 4, p. 533–542, 2004.
- GEHL, J. **Cidades para Pessoas** (2ªed.). Editora Perspectiva, São Paulo. 2010.
- GKRITZA, K.; MANNERING, F. L. Mixed logit analysis of safety-belt use in single- and multi-occupant vehicles. **Accident Analysis and Prevention**, v. 40, p. 443–451, 2008
- GREENE, W. H.; HENSHER, D. A. **Modeling ordered choices: A primer**. Cambridge University Press, 2010
- HAUER, E.. The frequency-severity indeterminacy. **Accident Analysis and Prevention**, v. 38, n. 1, p. 78–83, 2006.
- HAUER, E.; HAKKERT, A S. Extent and some implications of incomplete accident reporting. **Transportation Research Record**, v. 1185, p. 1–10, 1988.
- HAUSMAN, J.; MCFADDEN, D. Specification Tests for the Multinomial Logit Model. **Econometrica**, v. 52, n. 5, p. 1219–1240, 1984.
- HOLDRIDGE, J. M.; SHANKAR, V. N.; ULFARSSON, G. F. The crash severity impacts of fixed roadside objects. **Journal of Safety Research**, v. 36, n. 2, p. 139–147, 2005.
- HOSMER, D. W.; LEMESHOW, S.; STURDIVANT, R. X. **Applied Logistic Regression**. 3. Ed. New Jersey: Wiley, 2016
- ISMAIL, K; SAYED, T.; SAUNIER, N.; LIM, C. Automated analysis of pedestrian-vehicle conflicts using video data. **Transportation Research Record**, n. 2140, p. 44–54, 2009.
- JANG, K.; PARK, S.; KANG, S.; SONG, K.; KANG, S.; CHUNG, S. Evaluation of pedestrian safety: pedestrian crash hot spots and risk factors for injury severity. **Transportation Research Record**, n. 2393, p. 104–116, 2013.
- KIM, J. K.; ULFARSSON, G. F.; SHANKAR, V. N.; KIM, S. Age and pedestrian injury severity in motor-vehicle crashes: A heteroskedastic logit analysis. **Accident Analysis and Prevention**, v. 40, n. 5, p. 1695–1702, 2008.

- KIM, J. K.; ULFARSSOM, G. F.; SHANKAR, V. N. MANNERING, F. L. A note on modeling pedestrian-injury severity in motor-vehicle crashes with the mixed logit model. **Accident Analysis and Prevention**, v. 42, n. 6, p. 1751–1758, 2010.
- KIM, J. K.; ULFARSSON, G. F.; KIM, S.; SHANKAR, V. N. Driver-injury severity in single-vehicle crashes in California: A mixed logit analysis of heterogeneity due to age and gender. **Accident Analysis and Prevention**, v. 50, p. 1073–1081, 2013.
- KING, G.; ZENG, L. Logistic regression in rare events data. **Journal of Statistical Software**, v. 8, p. 137–163, 2003.
- KWIGIZILE, V.; SANDO, T. E CHIMBA, D. Inconsistencies of ordered and unordered probability models for pedestrian injury severity. **Transportation Research Record**, n. 2264, p. 110–118, 2011.
- LEE, C E ABDEL-ATY, M. Comprehensive analysis of vehicle-pedestrian crashes at intersections in Florida. **Accident Analysis and Prevention**, v. 37, n. 4, p. 775–786, 2005.
- LEFLER, D. E.; GABLER, H. C. The fatality and injury risk of light truck impacts with pedestrians in the United States. **Accident Analysis and Prevention**, v. 36, n. 2, p. 295–304, 2004.
- LI, D. E RANJITKAR, P.; ZHAO, Y.; YI, H.; RASHIDI, S. Analyzing pedestrian crash injury severity under different weather conditions. **Traffic Injury Prevention**, v. 18, n. 4, p. 427–430, 2017.
- LIU, J; HAINEN, A.; LI, X.; NIE, Q.; NAMBISAN, S. Pedestrian injury severity in motor vehicle crashes: An integrated spatio-temporal modeling approach. **Accident Analysis and Prevention**, v. 132, 2019
- LIU, J.; KHATTAK, A. J.; LI, X.; NIE, Q.; LING, Z. Bicyclist injury severity in traffic crashes: A spatial approach for geo-referenced crash data to uncover non-stationary correlates. **Journal of Safety Research**, v. 73, p. 25–35, 2020.
- LONG, J. S. **Regression Models for Categorical and Limited Dependent Variables**. 1. Ed. Thousand Oaks: SAGE Publications, 1997
- LORD, D.e MANNERING, F. L. The statistical analysis of crash-frequency data: A review and assessment of methodological alternatives. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, v. 44, n. 5, p. 291–305, 2010.
- MA, Z.; SHAO, C.; YUE, H.; MA, S. Analysis of the logistic model for accident severity on urban road environment. **Intelligent Vehicles Symposium, Proceedings**, p. 983–987, 2009.
- MACLEOD, K. E.; GRISWOLD, J. B.; ARNOLD, L. S.; RAGLAND, D. R. Factors associated with hit-and-run pedestrian fatalities and driver identification. **Accident Analysis and Prevention**, v. 45, p. 366–372, 2012.
- MANNERING, F. Temporal instability and the analysis of highway accident data. **Analytic Methods in Accident Research**, v. 17, p. 1–13, 2018.
- MANNERING, F. L.; BHAT, C. R. Analytic methods in accident research: Methodological frontier and future directions. **Analytic Methods in Accident Research**, v. 1, p. 1–22, 2014.

- MANNERING, F. L.; SHANKAR, V.; BHAT, C. R. Unobserved heterogeneity and the statistical analysis of highway accident data. **Analytic Methods in Accident Research**, v. 11, p. 1–16, 2016.
- MANSKI, C. F. MCFADDEN, D. **Structural Analysis of Discrete Data with Econometric Applications**. Cambridge: The MIT Press, 1982
- MARCOUX, R.; YASMIN, S.; ELURU, N.; RAHMAN, M. Evaluating temporal variability of exogenous variable impacts over 25 years: An application of scaled generalized ordered logit model for driver injury severity. **Analytic Methods in Accident Research**, v. 20, p. 15–29, 2018.
- MEYER, J.; AMICA, B.; LAURA D. City of Austin Pedestrian Safety Action Plan. p. 1–98, 2018.
- MIRANDA-MORENO, L. F.; MORENCY, P.; EL-GENEIDY, A. M. The link between built environment, pedestrian activity and pedestrian-vehicle collision occurrence at signalized intersections. **Accident Analysis and Prevention**, v. 43, n. 5, p. 1624–1634, 2011.
- NORTON, E. C.; DOWD, B. E.; MACIEJEWSKI, M.L. Marginal effects - quantifying the effect of changes in risk factors in logistic regression models. **Jama**, v. 321, n. 13, p. 1304–1305, 2019.
- OECD. Speed Management 2008. [s.l.] : OECD, 2008. Disponível em: < <https://www.itf-oecd.org/content/publication>>
- ORGANIZAÇÃO PAN-AMERICANA DE SAÚDE (OPAS). Gestão da velocidade: um manual de segurança viária para gestores e profissionais da área. 2012.
- ORTÚZAR, J. D e WILLUMSEN, L. G. **Modelling Transport**. 4ed. Wiley, 2011.
- PAPADIMITRIOU, E.; YANNIS, G.; GOLIAS, J. A critical assessment of pedestrian behaviour models. **Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour**, v. 12, n. 3, p. 242–255, 2009
- PASCUA, J. A. **Predictive and explanatory assessments of traffic-related pedestrian injuries**. (Tese), 2019. (Master of Science in Civil Engineering). Lakehead University, Thunder Bay, Ontario, 2019.
- PEDUZZI, P.; CONCATO, J.; KEMPER, E.; HOLFORD, T. R.; FEINSTEIN, A. R. A simulation study of the number of events per variable in logistic regression analysis. **J Clin Epidemiol**, v. 49, n. 2, p. 1373–1379, 1996.
- PENG, Y.; CHEN, Y.; YANG, J.; OTTE, D.; WILLINGER, R. A study of pedestrian and bicyclist exposure to head injury in passenger car collisions based on accident data and simulations. **Safety Science**, v. 50, n. 9, p. 1749–1759, 2012.
- POUR-ROUHOLAMIN, M.; ZHOU, H. Investigating the risk factors associated with pedestrian injury severity in Illinois. **Journal of Safety Research**, v. 57, p. 9–17, 2016.
- PRATO, C. G.; KAPLAN, S.; PATRIER, A.; RASMUSSEN, T. K. Considering built environment and spatial correlation in modeling pedestrian injury severity. **Traffic Injury Prevention**, v. 19, n. 1, p. 88–93, 2018.

- ROSÉN, E.; STIGSON, H.; SANDER, U. Literature review of pedestrian fatality risk as a function of car impact speed. **Accident Analysis and Prevention**, v. 43, n. 1, p. 25–33, 2011.
- ROTHMAN, L.; HOWARD, A. W.; CAMDEN, A.; MACARTHUR, C. (2012) Pedestrian crossing location influences injury severity in urban áreas. **Injury Prevention**, v. 18, n.6, p. 365-370.
- SALON, D.; MCINTYRE, A. Determinants of pedestrian and bicyclist crash severity by party at fault in San Francisco, CA. **Accident Analysis and Prevention**, v. 110, p. 149–160, 2018.
- SAVOLAINEN, P. T.; MANNERING, F.L.; LORD, D. E QUDDUS, M. A. The statistical analysis of highway crash-injury severities: A review and assessment of methodological alternatives. **Accident Analysis and Prevention**, v. 43, n. 5, p. 1666–1676, 2011.
- SEKARAN, U.; BOUGIE, ROGER. **Research methods for business**. 7. Ed. Chichester, United Kingdom, John Wiley & Sons, 2016
- SHINAR, D. **Traffic safety and human behavior**, 2. Ed. Emerald Group Publishing, 2017.
- SNYDER, M e KNOBLAUCH, R. **Pedestrian safety: the identification of precipitating factors and possible countermeasures**. National Highway Traffic Safety Administration. Report. Department of Transportation, Washington, DC., 1971
- SOBHANI, A.; YOUNG, W.; LOGAN, D. BAHROLOLOOM, S. A kinetic energy model of two-vehicle crash injury severity. **Accident Analysis and Prevention**, v.43, n.3, p. 741 – 754, 2011.
- SZE, N. N. e WONG, S. C. Diagnostic analysis of the logistic model for pedestrian injury severity in traffic crashes. **Accident Analysis and Prevention**, v. 39, n. 6, p. 1267–1278, 2007.
- TIWARI, G.; MOHAN, D. **Transport, planning and traffic safety: making cities, roads and vehicles safer**, 1. Ed. CRC Press, 2016
- TORRES, T. B.; URIARTE, A. M. L.; DEMORE, C. P.; NODARI, C. T. Prevalência de fatores associados à severidade dos acidentes em entorno de escolas. **Transportes**, v. 25, n. 3, p. 102, 2017.
- TRAIN, K. E. **Discrete choice methods with simulation**, 2. Ed. Cambridge University Press, 2003.
- TSUI, K. L.; SO, F. L.; SZE, N. N.; WONG, S. C.; LEUNG, T. F. Misclassification of injury severity among road casualties in police reports. **Accident Analysis and Prevention**, v. 41, n. 1, p. 84–89, 2009.
- UDDIN, M.; AHMED, F. Pedestrian injury severity analysis in motor vehicle crashes in Ohio. **Safety**, v. 4, n. 2, p. 1–10, 2018.
- VERZOSA, N.; MILES, R. Severity of road crashes involving pedestrians in Metro Manila, Philippines. **Accident Analysis and Prevention**, v. 94, p. 216–226, 2016.
- VIJVERBERG, W. Testing for IIA with the Hausman-McFadden test. **IZA Discussion Paper**, n. 5826, 2011.

WANG, Y. Y.; HAQUE, M. M.; CHIN, H. C.; YUN, J. G. J. Injury severity of pedestrian crashes in Singapore. **Australasian Transport Research Forum 2013 Proceedings**, v.8, 2013.

WASHINGTON, P. S.; KARLAFTIS G. M. E MANNERING F. L. **Statistical and econometric methods for transportation data analysis**. Nova Iorque: CRC Press, 2003

WELLE, B. et al. Sustentável e Seguro: Visão e Diretrizes para Zerar as Mortes no Trânsito. World Resources Institute, Washington, 2018.

WHELAN, M.; ELIA, A. D.; MUIR, C; CONGIU, M.; OXLEY, J.; CHARLTON, J. Child pedestrians: factors associated with ability to cross roads safely and development of a training package. **Monash University Accident Research Centre Report Documentation**, p. 93, 2008.

WORKING GROUP ON SERIOUS ROAD TRAFFIC CASUALTIES. **Reporting on Serious Road Traffic Casualties**. p. 107, 2010.

World Health Organization (2004). World report on road traffic injury prevention. [s.n.]. Disponível em: < <https://www.who.int/publications/i/item/world-report-on-road-traffic-injury-prevention>>

World Health Organization (2018). Global Status Report on Road Safety 2018. Geneva: [s.n.]. Disponível em: <https://www.who.int/violence_injury_prevention/road_safety_status/2018/en/>

XU, X.; HUANG, D.; GUO, F. Addressing spatial heterogeneity of injury severity using Bayesian multilevel ordered probit model. **Research in Transportation Economics**, v. 80, n. September, 2020.

YANG, J. Review of injury biomechanics in car-pedestrian collisions. **International Journal of Vehicle Safety**, v. 1, n. 1–3, p. 100–117, 2005.

YE, F.; LORD, D. Comparing three commonly used crash severity models on sample size requirements: Multinomial logit, ordered probit and mixed logit models. **Analytic Methods in Accident Research**, v. 1, p. 72–85, 2014.

ZAFRI, N. M.; PRITHUL, A. A.; BARAL, I.; RAHMAN, M. Exploring the factors influencing pedestrian-vehicle crash severity in Dhaka, Bangladesh. **International Journal of Injury Control and Safety Promotion**, v. 27, n. 3, p. 300-307, 2020.

ZAHABI, S. A. H.; Manaugh, K.; Miranda-Moreno, L.F. Estimating potential effect of speed limits, built environment, and other factors on severity of pedestrian and cyclist injuries in crashes. **Transportation Research Record**, n. 2247, p. 81–90, 2011.

ZAJAC, S. S.; IVAN, J. N. Factors influencing injury severity of motor vehicle-crossing pedestrian crashes in rural Connecticut. **Accident Analysis and Prevention**, v. 35, n. 3, p. 369–379, 2003.

ZEEDYK M.S.; KELLY L. Behavioural observations of adult-child pairs at pedestrian crossings. **Accident Analysis and Prevention**, v. 35, n. 5, p. 771–776, 2003.

ZHENG, L.; SAYED, T. A full Bayes approach for traffic conflict-based before–after safety evaluation using extreme value theory. **Accident Analysis and Prevention**, v. 131, n. July, p. 308–315, 2019.