

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



MODELAÇÃO DE ACIDENTES NUMA REDE URBANA DE TRANSPORTE FERROVIÁRIO

Paulo Francisco Morais Bastos

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM VIAS DE COMUNICAÇÃO

Orientador: António José Fidalgo do Couto (Phd, Professor)
Co-orientador: António Manuel Cabral Vieira Lobo (PhD, Professor)

Junho de 2022

*“A Lei da Mente é implacável:
O que você pensa, você cria.
O que você sente, você atrai.
O que você acredita, torna-se realidade”*

Siddhartha Gautama

Resumo

O metro do Porto é um sistema de metro ligeiro que funciona numa rede híbrida que combina as características dos sistemas de metro subterrâneo com os sistemas de eléctrico que operam à superfície. No centro da cidade, a rede é essencialmente composta por túneis subterrâneos. Nas áreas periféricas, existem alguns troços de superfície completamente segregados dos outros modos de transporte, mas também muitos troços onde o metro partilha o espaço público com o tráfego rodoviário, pedonal e modos suaves, sendo mais propenso à ocorrência de incidentes e acidentes.

O principal objetivo deste trabalho é modelar a frequência de acidentes na rede de metro do Porto, identificando os pontos negros gerados a partir de ocorrências de acidentes, como colisões com veículos de terceiros e atropelamentos de peões. Para tanto, o trabalho se concentrará na identificação das características intrínsecas dos lugares que contribuem para esses episódios.

Até o momento, foi realizada uma análise global, considerando os tipos de acidentes supracitados, mas será desenvolvido um estudo separado dessas ocorrências. Os resultados preliminares mostram que, dentre as características investigadas do local (túnel ou não; cercado ou não; tipo de uso do solo; número de cruzamentos com a malha viária; largura do canal rodoviário e ferroviário; comprimento do trecho; frequência média do metrô), aqueles que influenciam no aumento do número de acidentes são: extensão, frequência, número de cruzamentos e trechos de superfície.

Palavras-chave: Sistema de metro do Porto; Modelação de acidentes; Colisões; Atropelamento de peões.

Abstract

Porto metro is a light-rail system running on a hybrid network that combines the characteristics of underground subway systems with tramway systems operating at the surface. In the city centre, the network is essentially composed by underground tunnels. In the peripheral areas, there are some overground sections completely segregated from the other transport modes, but also many sections where the metro shares the public space with the road traffic, pedestrians and soft modes, being more prone to the occurrence of incidents and accidents.

The main objective of this work is to model crash frequency in the Porto's metro network, identifying the black spots generated from crash occurrences, such as collisions with third-party vehicles and pedestrians being run over. To this end, the work will focus on the identification of the intrinsic characteristics of the places that contribute to these episodes. So far, a global analysis has been carried out, considering the abovementioned crash types, but a separate study of these occurrences will be developed. The preliminary results show that, among the investigated characteristics of the place (tunnel or not; fenced or not; type of land use; number of intersections with the road network; road and railway channel width; section length; average metro frequency), those that influence the increase in the number of accidents are: length, frequency, number of crossings, and surface sections.

Key-words: Porto metro system; Crash modelling; Collisions; Pedestrian run over.

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço a Deus por toda força, orientação, paciência e resiliência em toda a minha vida. Ele mostrou a sua presença ao meu redor em todos os dias e nunca me abandonou nos momentos de necessidade durante a minha jornada.

Eu gostaria de agradecer a Professora Doutora Sara Ferreira, ao meu orientador António Couto e coorientador António Lobo, por toda a ajuda no desenvolvimento deste trabalho e maestria no transcorrer dos estudos. Obrigado por todo suporte e contribuição, como também todo o apoio para o meu crescimento e por sua paciência em todo o processo.

Expresso minha gratidão a toda a minha família por sempre acreditar em mim e por serem tão compreensivos com os meus esforços e limitações, fazendo sempre o possível para proverem os meios necessários para chegar aonde cheguei. Especialmente aos meus pais, Wilmar e Diuva, e a minha irmã, Marina, por todo o amor incondicional e força que me dão desde sempre. Vocês são os responsáveis pelo meu desenvolvimento como ser humano, minha mais sincera gratidão. Obrigado por sempre acreditarem e serem o meu motivo de orgulho.

Eu gostaria de agradecer a todos os meus amigos que estiveram comigo durante toda a minha jornada académica. Em especial, aqueles que me acompanharam durante o desenvolvimento deste trabalho, me dando forças e conselhos de como prosseguir; e muito obrigado à Hudyeron, Mudassar, Fabíola e René por toda ajuda direta ao lerem a dissertação, opiniões sobre os dados e desenvolvimento de apresentações.

Eu gostaria de agradecer a todos que trabalharam comigo durante os estágios extracurriculares que fiz, por me ensinarem tanto e esclarecerem muitas dúvidas e questionamentos que tive.

E finalmente, obrigado a todos que me fizeram criar tanto carinho pela especialização de planeamento urbano e transportes, mostrando como esta área é tão importante e especial para o desenvolvimento de uma sociedade, me fazendo ter certeza de que é isto que quero para minha futura carreira.

Índice Geral

Capítulo 1: Introdução	1
1.1 - Contextualização e Motivação	1
1.2 - <i>Objetivos</i>	6
1.3 - <i>Estrutura da Dissertação</i>	6
1.4 - <i>Desenvolvimento do Trabalho em Colaboração Empresarial</i>	6
Capítulo 2: Modelos Estatísticos	8
2.1 - <i>Natureza dos Acidentes</i>	8
2.2 - <i>Modelos Estatísticos de Acidentes</i>	13
2.3 - <i>Modelos de Frequência de Acidentes</i>	15
2.3.1 - MODELO DE REGRESSÃO DE POISSON	15
2.3.2 - MODELO DE REGRESSÃO BINOMIAL NEGATIVA	16
2.3.3 - MODELO POISSON-LOGNORMAL	16
2.3.4 - MODELO POISSON INFLACIONADO DE ZEROS E BINOMIAL NEGATIVO INFLACIONADO DE ZEROS	17
2.3.5 - MODELOS DE PARÂMETROS ALEATÓRIO	17
2.3.6 - MODELOS MULTINOMIAIS NEGATIVOS	17
2.3.7 - MODELO DE REGRESSÃO GAMA	18
2.3.8 - MODELO DE EQUAÇÃO DE ESTIMATIVA GENERALIZADA	18
2.3.9 - MODELOS BIVARIADOS / MULTIVARIADOS	18
2.3.10 - MODELOS HIERÁRQUICOS / MULTINÍVEIS	19
2.3.11 - MODELOS DE MACHINE LEARNING	19
2.4 - <i>Elementos do Modelo</i>	20
2.4.1 - UNIDADE DE OBSERVAÇÃO	20
2.4.2 - VARIÁVEL DEPENDENTE	20
2.4.3 - VARIÁVEL INDEPENDENTE	21
2.4.4 - VARIÁVEIS PARA SEGMENTOS DE RODOVIA	21
2.4.5 - EXPOSIÇÃO	22
2.4.6 - FUNÇÃO DO MODELO	22
2.4.7 - SOBREDISPERSÃO	23
Capítulo 3: Metodologia	24
3.1 - Definição da Área de Estudo	24
3.2 - Recolha e Tratamento de Dados	31
3.2.1 - DADOS DO NÚMERO DE ACIDENTES	32
3.2.2 - DADOS DA FREQUÊNCIA DE PASSAGEM DE VEÍCULOS DO METRO	33
3.2.3 - DADOS DA INFRAESTRUTURA	36
3.3 - Segmentação da Rede e Construção da Base de Dados	39
3.4 - Seleção de Variáveis Independentes	40
3.5 - Modelação	41
3.5.2 - ETAPAS DA MODELAÇÃO	42
3.5.2 - AVALIAÇÃO DO MODELO	42
Capítulo 4 : Resultados e Análises	44
4.1 - Análise Cluster dos Acidentes Totais	45
4.1.1 - INTERPRETAÇÃO DOS COEFICIENTES DO MODELO	45

4.2 - Modelo de Previsão de Frequência de Acidentes de Colisões com Veículos Terceiros	46
4.2.1 - RESULTADOS DO MODELO	46
4.2.2 - INTERPRETAÇÃO DOS COEFICIENTES DO MODELO	48
4.3 - Modelo de Previsão de Frequência de Acidentes com Peões	50
4.3.1 - RESULTADOS DO MODELO	50
4.3.2 - INTERPRETAÇÃO DOS COEFICIENTES DO MODELO	51
Capítulo 5: Conclusão	53
5.1 - LIMITAÇÕES	54
5.2 - RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	55

Índice de Figuras

Figura 1 - Taxa de acidentes de circulação por milhão de passageiros (AMT, 2021)	4
Figura 2 - Número de acidentes em zonas públicas (AMT, 2021)	5
Figura 3 - Taxa de acidentes em zonas públicas por milhão de passageiros (AMT, 2021)	5
Figura 4 - Matriz de risco e compreensão, adaptada da matriz da Boston Consulting (Bowman, 1990).....	13
Figura 5 - Estações e troços entre estações da linha A (Autor, 2022)	25
Figura 6 - Estações e troços entre estações da linha B (Autor, 2022)	26
Figura 7 - Estações e troços entre estações da linha C (Autor, 2022)	26
Figura 8 - Estações e troços entre estações da linha D (Autor, 2022)	27
Figura 9 - Estações e troços entre estações da linha E (Autor, 2022)	27
Figura 10 - Estações e troços entre estações da linha E (Autor, 2022)	28
Figura 11 - Mapa da rede metroviária do Porto (Metro do Porto, 2020)	29
Figura 12 - Total de acidentes em números globais, 2012 - 2020 (Autor, 2022)	30
Figura 13 - Total de acidentes em percentagem, 2012 - 2020 (Autor, 2022).....	30
Figura 14 - Curva da silhueta (Autor, 2022)	44
Figura 15 - Amostras dos 5 clusters no esboço amostral nos acidentes totais (Autor, 2022). ..	45
Figura 16 - Amostras dos 5 clusters no esboço amostral dos acidentes de colisão (Autor, 2022).	48
Figura 17 - Amostras dos 5 clusters no esboço amostral nos acidentes com peões (Autor, 2022).	51

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Número de acidentes por categoria, 2011 - 2020 (IMT, 2020)	4
Tabela 2 - Unidades de observação (Autor, 2022)	20
Tabela 3 - Frequência média diária anual de passagem de veículos/linha, 2012 - 2020 (Autor, 2022)	31
Tabela 4 - Valor de cada tipologia dos acidentes nos 3 anos de maior incidência (Autor, 2022)	32
Tabela 5 - Totais de acidentes de colisão e atropelamento de peões por ano, 2012-2020 (Autor, 2022)	32
Tabela 6 - Frequência média diária anual - dias úteis, sábado e domingo, linha A de 2012 a 2020 (Autor, 2022)	33
Tabela 7 - Frequência média diária anual - dias úteis, sábado e domingo, linha B de 2012 a 2020 (Autor, 2022)	34
Tabela 8 - Frequência média diária anual - dias úteis, sábado e domingo, linha C de 2012 a 2020 (Autor, 2022)	34
Tabela 9 - Frequência média diária anual - dias úteis, sábado e domingo, linha D de 2012 a 2020 (Autor, 2022)	34
Tabela 10 - Frequência média diária anual - dias úteis, sábado e domingo, linha E de 2012 a 2020 (Autor, 2022)	35
Tabela 11 - Frequência média diária anual - dias úteis, sábado e domingo, linha F de 2012 a 2020 (Autor, 2022)	35
Tabela 12 - Frequência média diária anual nos locais em que passam as seguintes linhas, 2012-2020 (Autor, 2022)	35
Tabela 13 - Segmentos e suas características geométricas, 2020 (Autor, 2022)	36
Tabela 14 - Segmentos e suas características geométricas, 2020 (Autor, 2022)	37
Tabela 15 - Segmentos e suas características geométricas, 2020 (Autor, 2022)	38
Tabela 16 - Segmentos e suas características geométricas, 2020 (Autor, 2022)	38
Tabela 17 - Segmentos e suas características geométricas, 2020 (Autor, 2022)	38
Tabela 18 - Segmentos e suas características geométricas, 2020 (Autor, 2022)	39
Tabela 19 - Resultados dos clusters de acidentes totais, excepto o parâmetro Ocupação do Solo (Autor, 2022)	45
Tabela 20 - Resultados dos clusters de acidentes totais, somente o parâmetro Ocupação do Solo (Autor, 2022)	45
Tabela 21 - Resultados estimação dos parâmetros, modelo Poisson de acidentes de colisão com veículos (Autor, 2022)	47
Tabela 22 - Resultados dos clusters de acidentes de colisão com veículos, excepto o parâmetro Ocupação do Solo (Autor, 2022)	48
Tabela 23 - Resultados dos clusters de acidentes de colisão com veículos, somente o parâmetro Ocupação do Solo (Autor, 2022)	48
Tabela 24 - Resultados estimação dos parâmetros, modelo Poisson de acidentes envolvendo peões (Autor, 2022)	50
Tabela 25 - Resultados dos clusters de acidentes com peões, excepto o parâmetro Ocupação do Solo (Autor, 2022)	51

Tabela 26 - Resultados dos clusters de acidentes com peões, somente o parâmetro Ocupação do Solo (Autor, 2022)	51
---	----

Abreviaturas

AEA	Agência Europeia do Ambiente
AMT	Autoridade da Mobilidade e dos Transportes
ATC	<i>Air Traffic Control</i>
AVC	Acidente Vascular Cerebral
BN	Binomial Negativo
EU	<i>European Union</i>
GEE	Gases com Efeito Estufa
HFACS	<i>Human Factors Analysis and Classification System</i>
IMT	Instituto da Mobilidade e dos Transportes
ML	<i>Machine Learning</i>
MLG	Modelos Lineares Generalizados
MPA	Modelos de Previsão de Acidentes
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
OMS	Organização Mundial da Saúde
PN	Passagens de Nível
PRR	Plano de Recuperação e Resiliência
RAIB	<i>Rail Accident Investigation Branch</i>
SCM	<i>Swiss Cheese Model</i>
SLAMP	Sistema de Metro Ligeiro da Área Metropolitana do Porto
STAMP	<i>Systems Theoretic Accident Modelling and Processes</i>
VACP	Visual, Auditivo, Cognitivo e Psicomotor

Capítulo 1: Introdução

1.1 - Contextualização e Motivação

O sistema de transportes públicos vem sendo cada vez mais visados como uma boa alternativa para amenizar o fluxo de carros e, conseqüentemente, o congestionamento da rede viária de uma cidade. Dentre as possibilidades, o metro é uma alternativa que possui pouca interação com os veículos de terceiros, além de ter uma via dedicada à sua circulação, quando esta não é feita de modo subterrâneo.

Quando bem dimensionado, além da eficiência, essa modalidade de transporte ajuda a amenizar os impactos ambientais gerados pela emissão de gases nocivos oriundos da queima de combustíveis, ruídos urbanos ocasionados pelo fluxo de veículos, possíveis estresses da condução e número de acidentes mortais. Contudo, não é por gerar uma redução do número de acidentes numa perspectiva macro dos transportes numa cidade, que o metro seja exceção e totalmente seguro.

Mesmo não possuindo elevados índices de acidentes em redes metroviárias, ainda há a possibilidade de ocorrência de fenômenos como colisões com veículos de terceiros, acidentes de quedas das plataformas para a linha, atropelamentos de peões (quando a circulação não é subterrânea e não vedada para peões), fechamentos de portas nos passageiros, quedas de passageiros em frenagens abruptas, além do descarrilamento, como pode-se imaginar.

No que tange a poluição do ar e os seus malefícios, cerca de 2.000 cidades/assentamentos humanos estão sendo monitorados e, com sustento nos dados coletados de 2011 a 2022 pela Organização Mundial da Saúde (OMS), o nível de partículas nocivas no ar teve um aumento de 6 vezes. Além disto, as evidências sobre os danos causados ao corpo humano devido a poluição do ar vem aumentando cada vez mais, como através de pesquisas que apontam os danos causados ao cérebro contribuem para a ocorrência de Acidente Vascular Cerebral (AVC) (Feigin et al., 2016).

Em 2017, as emissões no setor de transportes da Europa superaram em 28% os níveis registrados em 1990 e, mesmo que os países de renda mais alta tenham menor poluição por partículas (OMS, 2022), a maioria das cidades tem problemas com dióxido de nitrogênio.

Por tal razão, a Comissão Europeia lançou o Acordo Verde ao fim de 2019. Segundo matéria elaborada pelo veículo de comunicação alemão Deutsche Welle no ano de 2020, em entrevista com a Comissária Europeia de Transportes, Adina-loana Valean, quando anunciado a respeito do Acordo Verde a mesma afirma que:

“Por meio do Acordo Verde, comprometemo-nos a fazer que o setor de transportes da Europa contribua com os esforços para combater as mudanças climáticas. Todos os meios precisam colaborar, mas o ferroviário é um divisor de águas, enquanto maneira verdadeiramente sustentável de transportar passageiros e cargas”.

Além disso, de acordo com a Agência Europeia do Ambiente (AEA) os veículos rodoviários (automóveis, furgonetas, camiões e autocarros) são responsáveis por mais de 70% das emissões de gases com efeito estufa, os demais valores são basicamente, em sua totalidade, oriundos da navegação e aviação (AEA, 2020). Sendo que, de acordo com a Comissão Europeia, na União Europeia (EU) menos de 0,5% desses gases competem ao transporte ferroviário (Comissão Europeia, 2021).

Trazendo agora para a realidade portuguesa, de acordo com o relatório dos sistemas de metro emitido pela Autoridade da Mobilidade e dos Transportes (AMT, 2021), e utilizando a metodologia de cálculo da Agência Portuguesa do Ambiente, o impacto das emissões de gases com efeito estufa (GEE) causados pelo sistema metroviário português no ano de 2019 é 5,4 vezes menor que o gerado pelos transportes individuais (automóveis). Nas horas de ponta, altura em que os transportes públicos apresentam as maiores taxas de ocupação, a sua vantagem ambiental em termos de emissões de GEE é muito superior.

As emissões provenientes dos sistemas de metro foram calculadas contabilizando as emissões associadas à produção da eletricidade consumida na tração dos comboios e a eletricidade utilizada para outros fins, principalmente, para iluminação das estações, ventilação e funcionamento dos meios de acessos mecânicos (escadas e tapetes rolantes e elevadores). O valor para o ano de 2019 calculado e utilizado no âmbito deste documento foi de 235,23 gCO₂/kWh (NIR - Portuguese National Inventory Report on Greenhouse Gases, 1990 - 2019).

Os cálculos realizados pela AMT estimam o impacto em termos de emissões de GEE provenientes da tração dos veículos nos três metros em 22,1 mil t CO₂e, e para as emissões associadas à eletricidade utilizada para outros fins (principalmente, para iluminação das estações, ventilação e outros) em cerca de 16,4 mil t CO₂.

Vale ressaltar que a emissão associada ao dióxido de carbono (CO₂), causada pelo metro, é devido a tração dos veículos e a sua eletricidade, usada para outras finalidades. Com isso, pode-se observar que o efeito que o sistema de metro tem para descarbonização em relação ao transporte rodoviário, por causa das emissões unitárias muito inferiores.

Ainda de acordo com AMT (2021), a rede metroviária em Portugal é 100% elétrica. Não obstante, o investimento em medidas de aumento da eficiência energética e a opção por energia elétrica proveniente de fontes renováveis permitirá reforçar as vantagens ambientais

deste modo de transporte face a outras alternativas de transporte em áreas urbanas, sendo este modo um forte aliado na conquista de uma Economia Hipocarbônica.

Tendo isto em consideração, o Plano de Recuperação e Resiliência (PRR) aborda a mobilidade sustentável, como relevante para a melhoria dos sistemas de transporte coletivo, para o reforço e utilização cada vez mais progressiva do transporte público, assim como para a descarbonização do setor dos transportes.

O que torna como uma motivação a mais, uma vez que no ano de 2021 a OMS revisou as suas diretrizes de qualidade do ar, sendo mais rigorosa quanto ao esforço para ajudar os países a avaliar a salubridade do ar. Além de solicitar uma rápida intensificação das ações e, dentre estas, construir mais sistemas de transportes públicos de forma que sejam seguros, acessíveis e amigáveis para os que se encontram em sua envolvente, nomeadamente os ciclistas e peões. Atendendo assim, uma faixa específica da população, a qual pode crescer o número de usuários. Caso seja bem ofertado, se torna um atrativo para as pessoas deixarem de usar transportes particulares, já que evitarão o estresse, possíveis acidentes e terão menor custo para deslocamento (Cascetta, 2009).

Com o aumento dos utilizadores, deve-se ter em atenção a um constante crescimento nas melhorias de segurança. Haja que o número de acidentes no setor ferroviário ainda é tido como um valor expressivo (Evans, 2013). Ainda que a complexidade, da sua infraestrutura e estrutura organizacional, seja tão acentuada quando comparada a outros meios de transporte, a eficiência e a segurança das operações baseiam-se em diversos fatores, como as regras vigentes para o tráfego, confiança no equipamento, administração e fatores humanos (Zhou e Lei, 2018).

É sabido que a maioria dos acidentes de segurança tem como contributo o erro humano (Reason, 1990). Como, por exemplo, foi constatado que os sinistros gerados por falha humana no sistema ferroviário (Baysari et al., 2009) e no sistema de controle de tráfego aéreo (Shorrock e Kirwan, 2002) são da ordem de no mínimo 90% e de 80-90%, respetivamente, da totalidade nestes setores.

Além disso, também deve-se ter uma atenção a ótica da segurança rodoviária, quando outros veículos dividem espaço com o metro. Tal afirmação necessita de ser reforçada, já que é largamente conhecido que as pessoas subestimam a ocorrência de um evento negativo com elas por uma atitude definida, por Barros (2005), como otimismo irreal. Ainda mais que os condutores no meio urbano subestimam o risco de serem envolvidos em acidentes com o metro, por causa das baixas velocidades destes meios de transporte e por considerarem a si mesmos como cuidadosos (Guerrieri, 2018; Bazerman e Moore, 2009).

A imagem a seguir, tabela 1, traz o número de acidentes significativos e desagregados por categorias, em sua totalidade, registadas dos anos de 2011 a 2020 para o transporte ferroviário português. Os dados coletados pelo Instituto da Mobilidade e dos Transportes (IMT).

Tabela 1 - Número de acidentes por categoria, 2011 - 2020 (IMT, 2020)

Número total de acidentes significativos e desagregação por categoria	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	Média 10 anos	Média 5 anos
Colisões de comboios, incluindo colisões com obstáculos dentro do gabarito	1	1	1	7	1	4	0	6	3	4	2,80	3,40
Descarrilamentos de comboios	2	0	4	3	3	5	3	4	0	3	2,70	3,00
Acidentes em PN, incluindo acidentes envolvendo peões	7	11	12	9	6	8	7	7	16	10	9,30	9,60
Acidentes com pessoas causados por material circulante em movimento, com a exceção de suicídios	17	23	31	31	13	21	19	20	30	26	23,10	23,20
Incêndios em material circulante	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00
Outros	0	1	0	0	0	0	0	0	2	0	0,30	0,40
Total de todos os acidentes	27	36	48	50	23	38	29	37	51	43	38	40

Consistentemente, ao longo dos últimos dez anos, e à semelhança do que acontece nas restantes redes de caminho-de-ferro europeias, as duas categorias que registam a maioria dos acidentes são, respetivamente, as relativas aos acidentes com pessoas causados por material circulante em movimento (com a exceção de suicídios) e aos acidentes em Passagens de Nível (incluindo acidentes envolvendo peões), tendo estes sido os causadores de 88,10 % das fatalidades e feridos graves registados em Portugal em 2020.

Este facto vem, mais uma vez, reforçar e consolidar a perceção dos bons níveis de análise, gestão e controlo dos riscos intrínsecos à exploração ferroviária, num contexto de alargado número de utilizadores e trabalhadores do sistema de transporte ferroviário.

A seguir, no que tange à circulação dos veículos da rede metroviária portuguesas em zonas urbanas, pode-se observar nas figuras 1, 2 e 3:

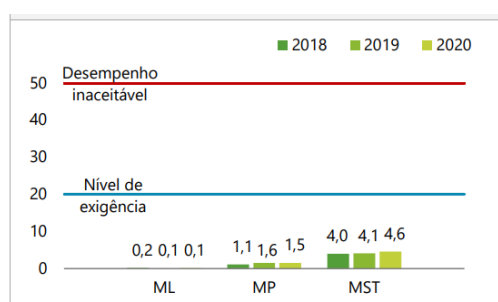


Figura 1 - Taxa de acidentes de circulação por milhão de passageiros (AMT, 2021)

Observação: ML (Metro do Lisboa), MP (Metro do Porto), MST (Metro Sul do Tejo).

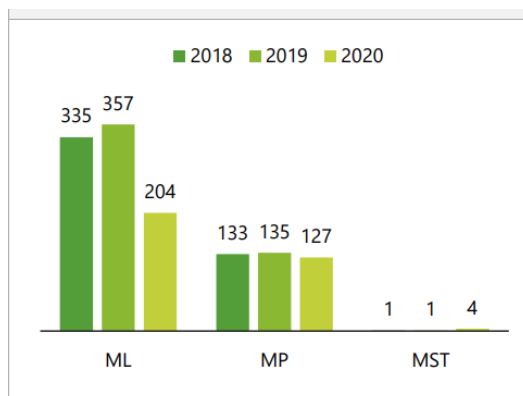


Figura 2 - Número de acidentes em zonas públicas (AMT, 2021)

Observação: ML (Metro do Lisboa), MP (Metro do Porto), MST (Metro Sul do Tejo).

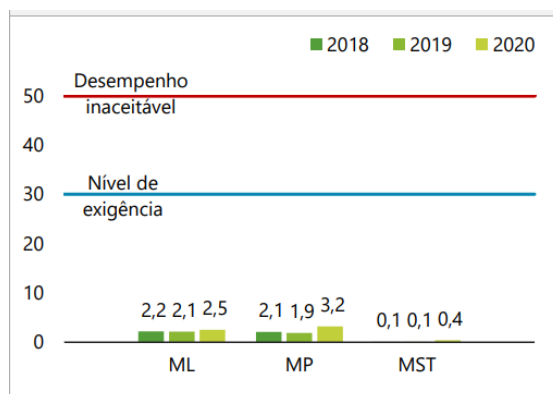


Figura 3 - Taxa de acidentes em zonas públicas por milhão de passageiros (AMT, 2021)

Observação: ML (Metro do Lisboa), MP (Metro do Porto), MST (Metro Sul do Tejo).

No que respeita a acidentes em zonas públicas, a ocorrência deste tipo de acidentes dá-se maioritariamente no Metro de Lisboa (204 acidentes em 2020), com um decréscimo de 43% em comparação com o período homólogo, o que pode justificar-se pela redução do número de passageiros transportados. Enquanto o Metro do Porto reportou 127 ocorrências em 2020, verificando-se uma diminuição de 6%.

Contudo, é possível justificar que isto ter vindo a ocorrer em detrimento da pandemia do vírus SARS-CoV-2 que teve início no ano de 2020 e, por isto, teve-se de alterar a frequência e/ou paralisar a operação do metro durante determinado intervalo de tempo.

Em virtude ao que foi tratado até então, a maneira mais científica para a prevenção de tais eventos é através da análise dos fatores que geram as situações mais correntes e, só então, partir para decisão de medidas corretivas para controle de risco (Klockner e Toft, 2018).

1.2 - Objetivos

Este trabalho tem como principal objetivo a modelação da frequência de acidentes numa rede urbana de transporte ferroviário. O trabalho tem como finalidade identificar as características intrínsecas aos locais que contribuem para os episódios de causalidades.

1.3 - Estrutura da Dissertação

O presente trabalho de dissertação encontra-se estruturado em 5 capítulos.

No capítulo 1 é realizada a introdução a temática do trabalho, com sua contextualização, motivação, objetivos e estrutura.

Já no capítulo 2 é exposto o estado da arte sobre os modelos estatísticos de possível aplicabilidade aos acidentes, com a descrição sucinta da natureza dos acidentes, abordagem dos modelos estatísticos com os principais métodos.

Seguidamente, no capítulo 3 tem a metodologia aplicada e como foi feita a identificação do modelo utilizado.

O capítulo 4 é voltado para apresentação e explicação dos resultados alcançados por meio das análises.

Por último, no capítulo 5 tem as conclusões finais.

1.4 - Desenvolvimento do Trabalho em Colaboração Empresarial

Este trabalho em questão foi desenvolvido em colaboração empresarial em conjunto com a empresa Via Porto e a Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP). Mesmo que este não tenha sido realizado de modo presencial na empresa fornecedora dos dados, esta iniciativa auxilia na aproximação da academia com a prática laboral, possibilitando melhorar o desempenho das empresas atuantes no mercado.

A Via Porto é uma empresa do Grupo Barraqueiro criada em 2018, sucedendo a até então Prometro (empresa do mesmo grupo, de 2010 a 2018), atuando como subconcessionada responsável pela operação e manutenção do Sistema de Metro Ligeiro da Área Metropolitana do Porto (SLAMP). Contando com uma frota de 102 veículos (72 unidades do modelo Eurotram e 30 unidades de Tram-Train) distribuídos em suas atuais 6 linhas (correspondendo a mais de 67 quilómetros de rede) e servindo até 9.000 passageiros por hora e por sentido, nos períodos de ponta.

Esta dissertação foi desenvolvida no âmbito de planeamento do território e transportes, em associação o Via Porto. O objetivo foi elaborar modelos estatísticos focados na pormenorização da associação existente entre a frequência de acidentes e as características de cada local da rede metroviária. Com isto, contribuir para que através da base técnica e o estudo dos dados de acidentes, possa auxiliar nas decisões estratégicas que objetivam sanar os pontos negros existentes, de preferência reduzir a zero o número de acidentes.

Capítulo 2: Modelos Estatísticos

2.1 - Natureza dos Acidentes

De acordo com o modelo de processamento de informações humanas de Wickens, toda e qualquer atividade realizada por condutores (transporte individual/coletivo e privado/público), sujeita ao erro humano, pode ser fracionada em grupos de comportamentos que englobam desde a captação de estímulos sensoriais pelo realizador da ação até a execução de uma resposta. As condutas específicas associadas a cada tarefa são vinculadas, em sua maioria, ao grau de complexidade e familiarização da emergência em questão.

Através da teoria dos recursos múltiplos de Wickens (Wickens, 2008), os diferentes artifícios de tratamento de informação e demandas de meios de atenção que uma pessoa possa vir a ter, são descritos como um processamento gerado por quatro componentes. Classificados por Keller (2002) como comportamento Visual, Auditivo, Cognitivo e Psicomotor (VACP), tal categorização pode ser utilizada para descrever a tipificação dos erros dos condutores.

Além disso, é largamente conhecido que as pessoas subestimam a ocorrência de um evento negativo com elas por uma atitude definida, por Barros (2005), como otimismo irreal. Isto ressalta a necessidade de se ter uma atenção maior a ótica da segurança, ao invés de desmerecê-la. Ainda mais que, no meio urbano, os condutores subestimam o risco de serem envolvidos em acidentes com o metro, por causa das baixas velocidades destes meios de transporte e por considerarem a si mesmos como cuidadosos (Guerrieri, 2018; Bazerman e Moore, 2009).

Entretanto, analisar um acidente é uma tarefa complexa. Uma vez que, apontar um único motivo que originou o acidente é algo impreciso e, ainda mais que, somente uma associação de fatores de risco que resulta numa casualidade. Desta forma, as principais circunstâncias, erros ou ações que geram os acidentes, designada como fatores de risco contribuintes, mostram quais são as condições propícias para a origem da ocorrência e, desta maneira, fornecer indícios do modo evitar futuras casualidades, quando se deparar com situações de causas semelhantes (Chargas, 2011).

Assim, Elvik (2006) exhibe quatro leis objetivando a fundamentação do episódio de um acidente, o que veio a auxiliar os estudos futuros sobre esta temática. Sendo que os eventos, antecessores e sucessores ao acidente, revelam fatores que estão ligados ao nível de severidade, assim como as soluções ou alternativas tecnológicas capazes de evitar o acontecimento, ou então, o grau do dano causado (AASHTO, 2009).

Essas leis levam consigo o conceito da causalidade de acidentes e são possíveis de serem testadas na prática, sendo elas:

- Lei universal do aprendizado: traduz que o nível de experiência do condutor resulta na maior capacidade de perceber e administrar os possíveis riscos para um acidente. Ou seja, quanto maior a experiência, menores são as chances de ter uma ocorrência;
- Eventos raros: quanto menores são as chances de acontecer um evento específico, mais imprevisível ele é;
- Complexidade: quando vários eventos importantes e não relacionados entre si são aglomerados, os condutores podem sofrer com impasses cognitivos;
- Capacidade cognitiva: relacionada à baixa necessidade da tomada de decisões momentâneas, pelos condutores, o que faz com que perca a concentração nas suas atividades.

Além disto, de acordo com Gold (1998), ainda há mais um fator que deve ser considerado como contribuinte direto para um acidente, o institucional/social. Este caberia a assuntos voltados a fiscalização e regulamentação. Contudo, este não será abordado neste estudo.

Mesmo assim, a ocorrência de um acidente por si só, não está restrita somente aos fatores designados pelas leis acima descritas, podendo ter outros agentes influenciando a casualidade (Elvik, 2006).

Tendo o que foi tratado até ao momento em vista e, de acordo com Guerrieri (2018), o metro do Porto enquadra-se na classificação de elétrico de classe A (corredor totalmente exclusivo), dado que seus veículos tem a sua circulação completamente separada da rede viária e os carris estão em nível com a superfície, subterrâneo ou elevado.

Indo mais a fundo a segurança e ressaltando aos interesses do presente estudo, a segurança envolvendo as passagens de nível (PN) é um dos assuntos mais problemáticos para uma infraestrutura sobre carris, sendo necessário sua abordagem de forma cautelosa e veloz (Ghazel, 2009, Liu et al., 2016, Mekki et al., 2012). Uma vez que, ao expressar em números, os acidentes em tais localidades retratam algo em torno de 30% da totalidade das ocorrências nas ferrovias europeias, gerando mais de 300 fatalidades a cada ano (Liu et al., 2016). Em determinados países a expressão de seus valores podem chegar a ordem dos 50% dos acidentes (Evans, 2011, Ghazel e El-Koursi, 2014).

Para uma melhor fiabilidade do serviço e eficiência no tempo de viagem, frequentemente são introduzidas medidas de prioridade para os elétricos (Yarra Trams, 2010). Tais implementações tendem a otimizar o sistema ao viabilizar que a preferência do elétrico na passagem seja mais protegida dos demais veículos. A prioridade possibilita alterar a natureza do ambiente viário, podendo ser classificada em termos espaciais ou temporais, enquanto a prioridade dada ao espaço implica em criar uma via dedicada aos veículos sobre carris (VicRoads, 2012, Vuchic, 2007), a voltada ao tempo pretende facilitar o movimento dos

elétricos por meio da semaforização das interseções (Nash, 2003, Currie e Shalaby, 2008, Yarra Trams, 2010, Association of German Transport, 2000). Como, ao exemplo prático, Shahla et al. (2009) realizou um estudo revelando a presença dos semáforos, assim como mencionados anteriormente, repercutiu de forma positiva para a redução do número de colisões em Toronto, Canadá.

Neste caso, ao tratar os elétricos como meios de transporte de viagens prioritárias, repercutiu em um acréscimo da confiabilidade e da procura por parte da população. Além do aumento na eficiência (Currie et al., 2012a, Currie et al., 2012b, Yarra Trams, 2010, Zhang e Garoni, 2013, Currie e Shalaby, 2007).

Ainda mais que, de forma geral, as ocorrências são majoritariamente classificadas como colisões entre elétrico e veículos terceiros, colisões com peões, quedas de passageiros e colisões entre elétricos (Naznin et al., 2018).

O que também pôde ser constatado através de pesquisas desenvolvidas nos EUA (Korve HW et al., 1996, Korve HW et al., 2001, Pecheux KK et al., 2009), onde foi levado em consideração 16 linhas diferentes, estas apontaram que a casualidade mais corrente é a colisão entre o elétrico e um veículo terceiro fazendo o movimento de viragem em cruzamentos. Tal observação leva a crer que o erro é exclusivamente do condutor, contudo, também deve-se constatar a possibilidade da não eficiência na hora da concepção da infraestrutura rodoviária (como sinais de trânsito ou estruturas físicas inconsistentes ou ausentes), levando o condutor a cometer equívocos. No que tange aos acidentes com os peões, vale ressaltar que o mesmo acontece pela não percepção deles a aproximação do elétrico.

Após o fenómeno de um acidente, uma equipa da fiscalização deve ir ao local e tomar os registos de forma que possibilite um futuro estudo a cerca do acontecimento de modo que não volte a acontecer ou, caso aconteça, gere o menor dano possível (ou seja, uma modelação do acidente). Para isto, são utilizados modelos (abordados mais a frente) que trazem diferentes formas que se pode observar um acidente de forma isolada.

Infelizmente, até o presente momento, não há pesquisas publicadas que venham a examinar os comportamentos de erros específicos dos condutores associados a situações do metro. Entretanto, de acordo com (Wang & Fang, 2014) é possível ter embasamento através de outras pesquisas, semelhantes e relevantes, voltadas a demais domínios do sistema de controle ferroviário e do sistema de controle de tráfego aéreo (ATC).

A origem da modelação de acidentes surge numa iniciativa para um entendimento mais fácil, até mesmo para quem não está familiarizado com tais informações, como através do uso de gráficos baseados em modelo linear de acidentes investigando as ações individuais ou de equipa, falhas técnicas e as condições dos locais e estrutura administrativa. Tendo o modelo dominó, proposto por Heinrich (1931), como o precursor e, mesmo com a sua simplicidade

(mostrando a interação homem-máquina), foi suficiente para transmitir que a investigação de forma linear pode revelar a contribuição dos fatores (na forma de trajetória dos eventos e quais devem ter mais atenção) para um acidente e auxiliar nas contramedidas.

Mesmo que um acidente possa ter caráter singular, isto não traduz que não exista semelhanças com outras ocorrências, e tais afinidades, geralmente encontram-se nos fatores apresentados no momento do surgimento da casualidade. Com isto, o padrão é determinado no local onde os eventos repetidos apresentam a mesma tipologia (Klockner & Toft, 2018).

Com o transcorrer do tempo, vários modelos de acidentes foram desenvolvidos, introduzidos e modificados (mediante a aplicação específica), como:

- Filial de investigação de acidentes ferroviários - Agência Britânica criada em 2005 (Zhou & Yan, 2018);
- Sistemas teóricos de modelação e processo de acidentes (Zhou & Yan, 2018);
- Modelo do queijo suíço (Reason, 1990);
- Sistema de Análise e Classificação de Fatores Humanos (Wiegmann e Shappell, 1997).

Filial de investigação de acidentes ferroviários (Rail Accident Investigation Branch, sigla em inglês RAIB) é um departamento do governo britânico voltado à investigação de acidentes e incidentes que ocorreram em sua malha ferroviária, a fim de descobrir as causas que levaram a tal acontecimento. Seu método é composto pela análise do acidente em questão comparando-o com outros que ocorreram em situações semelhantes, sendo que aquele com maior proximidade é tido como a causa e os demais são classificados como fatores causais. Como resultado, ao fim do estudo é apresentando um modelo onde consegue detalhar bem os eventos associados ao acidente, e pode ser utilizado para esta finalidade, mas não é capaz de relacionar os eventos entre si (Zhou & Yan, 2018).

Sendo sustentado por três conceitos básicos (restrição de segurança, estrutura hierárquica do controle de segurança e modelos de processos), os sistemas teóricos de modelação e processo de acidentes (Systems Theoretic Accident Modelling and Processes, sigla em inglês STAMP) é um modelo com foco voltado para a interação do que compõe o sistema e os mecanismos que controlam o mesmo. De acordo com Zhou & Yan (2018), o STAMP é sustentado pela teoria do sistema que afirma que cada nível/organização possui uma contribuição relevante para o êxito do sistema de controle de segurança ou para a ocorrência de um acidente.

Tal modelo defende que a causa originária do acidente foi devido a uma violação da restrição de segurança. Relacionando os vários fatores e comportamentos humanos no acidente, tendo o seu tempo de ocorrência tido em consideração. Além de maximizar a compreensão sobre o sinistro, uma vez que está voltado para identificar todos os problemas e causas que levaram ao acidente (Zhou & Yan, 2018).

O Sistema de Análise e Classificação de Fatores Humanos (Human Factors Analysis and Classification System, sigla em inglês HFACS) é um modelo sistemático que coloca em pauta o erro humano, sendo amplamente empregado nos setores de aviação e ferroviário. Tendo uma clara estrutura de organização, o HFACS contém possíveis atos de insegurança por parte dos operadores, falha na supervisão e influências organizacionais (Zhan et al., 2017). Tal modelo foi aplicado como um modo de determinar os erros associados em acidentes na Austrália (Baysari et al., 2008) e, Iridiastadi e Ikatrinasari (2012), usaram para compreender as causas que contribuíram para a ocorrência de determinados acidentes.

De acordo com Johnson (1999), até que esses problemas práticos sejam abordados, os modelos metafísicos de fracasso humano e organizacional terão pouca relevância prática. Uma vez que, os métodos de análise do comportamento do erro são baseados nos modelos teóricos de classificação do comportamento do erro humano que estão intimamente relacionados com as características do sistema e da tarefa.

Segundo Larouzee e Le Coze (2020), o modelo do queijo suíço (Swiss Cheese Model, sigla em inglês SCM) dita que para chegar até o acontecimento de um acidente, a falha deve percorrer várias camadas que representam o funcionamento operacional do objeto em questão e, cada camada, possui “furos” que possibilitam que o “erro” transpasse a esta até que a quantidade de erros sejam suficientes para gerar o acidente. Para solucionar o problema, basta colocar uma camada que impeça a passagem do erro. Este modelo recebe críticas por ser demasiado simples e geral, não representando graficamente a conexão entre as causas do acidente e, assim, limita o uso prático do SCM.

Ainda assim, de acordo com pesquisa desenvolvida por Underwood e Waterson (2013), foi revelado que o SCM ainda permanece como sendo popular, enquanto o STAMP não teve tanta adesão pela indústria, isto ocorre pela complexidade de sua aplicação quando tratada na prática (Salmon et al., 2012). Através de tal observação que Barnatt & Jack (2018) afirmam que, independentemente do modelo, se a sua execução não for simples, o mesmo não será empregado.

Por meio do conhecimento no que diz respeito ao risco de uma dada situação, é possível detalhar as medidas necessárias para eliminar ou controlar o mesmo. Levando para a realidade do setor ferroviário, há casos em que se tem a sua compreensão, mas eles não estão conectados a uma especificidade. Assim como tem momentos em que não se possui nem entendimento, nem conhecimento da existência do risco, fazendo-se improvável a realização de testes e criação de modelos. A figura abaixo representa a relação do risco com a compreensão (Barnatt & Jack, 2018).

		Risco	
		Conhecido	Desconhecido
Compreensão	Conhecido	Especificação	Conhecimento geral
	Desconhecido	Design/operação dos resultados	Desconhecido desconhecidos

Figura 4 - Matriz de risco e compreensão, adaptada da matriz da Boston Consulting (Bowman, 1990).

Interpretando a figura acima é possível observar que quanto maior a especificação em relação aos demais, maior será a probabilidade de ter situações bem-sucedidas. Contudo, Leveson (2011) afirma que apenas sistemas simples são capazes de serem compreendidos, defendendo a ideia da adequação dos sistemas complexos.

Agora, no âmbito de um estudo que engloba um conjunto de acidentes e possui a finalidade de analisar tal aglomerado em uma específica área de estudo, são utilizados Modelos de Previsão de Acidentes (MPA). Tais abordagens possibilitam observar, por meio de modelos matemáticos, as semelhanças e diferenças envolvidas entre as características da rede, a fim de poder atribuir a devida importância para os fatores tidos como de risco para o episódio de um acidente.

A seguir, serão tratados alguns dos modelos existentes e a forma que se dá o seu emprego em cada circunstância e, assim, elucidando os seus benefícios para aqueles que este estudo for de interesse.

2.2 - Modelos Estatísticos de Acidentes

As estratégias voltadas para a aplicação da modelação à análise de acidentes são comumente aceitas para o campo da segurança, com modelos desenvolvidos às singularidades dos dados (Chang, 2005).

Os MPAs são representações matemáticas as quais possuem o objetivo de indicar fatores que auxiliam no surgimento de um acidente ou magnitude das ocorrências e/ou estipular um valor previsto de ocorrências, através de variáveis que traduzem as características geométricas, assumindo segmentos ou interseções. Por assim ser, os modelos são conceitos de forma descomplicada da realidade, que possuem os fatores mais importantes em sua descrição (Hauer, 2004).

Na área da segurança que interessa a este trabalho, os MPAs são modelos formados por diferentes variáveis independentes que traduzem específicas propriedades da estrutura analisada. Neste caso, o objetivo é voltado para a descrição das ligações existentes entre os

acidentes e a infraestrutura da rede, sendo possível identificar os fatores que apresentam risco e, assim, colaboram para a ocorrência de um acidente.

De acordo com Ferraz et al. (2012), os usos mais distintos para este modelo de análise são ditos a seguir:

- Distinguir os fatores de maior relevância que colaboram para o acontecimento dos acidentes e elaborar estratégias para a mitigação relacionada a tais fatores;
- Expor as localidades que apresentam elevado risco e gravidade de se ter os acontecimentos;
- Qualificação financeira das ações das propostas de melhoria;
- Auxílio para definir os projetos voltados para a requalificação que ajudam na diminuição dos acidentes;
- Ajuda na tomada de decisões dos responsáveis pela administração, por meio da preferência das localidades ou ações que gerem a redução do número de casualidades.

Os MPAs são constituídos por uma variável dependente, designada também como variável resposta (Y) e traduz o número expectado de acidentes, e por variáveis independentes ($X_1, X_2, \dots, X_n$), que correspondem a um dado grupo de características em estudo, como por exemplo as propriedades geométricas que apresentam ligação com a variável dependente através da expressão $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n)$.

De acordo com Silva (2019), este modelo faz com que a variável dependente seja o número de acidentes por local na rede ou, então, a quantidade de acidentes por localidade e por ano. Por meio disto, apresentará a relação dos fatores de risco e o número de ocorrências.

O presente capítulo almeja descrever os principais modelos desenvolvidos e de uso mais comum. Geralmente, os trabalhos que trazem como foco no MPA são realizados desenvolvidos com base nos Modelos Lineares Generalizados (MLG). Sendo que estes foram desenvolvidos por meio de um grupo de métodos estatísticos, que usualmente são tratadas separadamente, e que através de uma junção da sua formulação possibilitou a evolução dos modelos clássicos de regressão. De acordo com McCullagh e Nelder (1989), os MLG são compostos por:

- As variáveis independentes são atribuídas em molde de estrutura linear e são tidas como elemento sistemático do modelo;
- A variável dependente é tida como a componente aleatório para o modelo e possibilita fazer com que as distribuições sejam: Poisson e Binomial Negativa (BN) quando se tem a contagem dos dados; Gama, Normais e Normal Inversa para os dados ininterruptos;
- A função de ligação tem a finalidade de estabelecer uma relação dos elementos aleatórios com os sistêmicos. Por exemplo, para modelos como os log-lineares a função empregada é a logarítmica.

2.3 - Modelos de Frequência de Acidentes

Nesta parte serão tratados os modelos mais usuais e propícios como modelos de previsão de acidentes.

A seguir serão mencionados e, posteriormente, descritos os modelos mais consolidados para previsão de acidentes (Lord & Mannering, 2010):

- Modelo de Regressão de Poisson;
- Modelo de Regressão Binomial Negativa;
- Modelo Regressão Poisson Lognormal;
- Modelo Regressão Inflacionada de Zero;
- Modelo de Parâmetros Aleatórios;
- Modelo Multinomial Negativo;
- Modelo de Regressão Gama;
- Modelo de Equações de Estimação Generalizadas;
- Modelo Multivariado;
- Modelos hierárquicos e Modelos de Machine Learning.

2.3.1 - MODELO DE REGRESSÃO DE POISSON

Partindo do princípio que não é viável o uso da regressão padrão de mínimos quadrados, já que esta trabalha com uma variável dependente contínua, enquanto o número de acidentes são ordenados inteiros e positivos. Por causa disto, o emprego do modelo de regressão de Poisson é um atrativo para iniciar a análise dos dados. A fórmula é descrita por:

$$P(y_i) = \frac{e^{-\lambda_i} (\lambda_i^{y_i})}{y_i!} \quad (1)$$

Em que $P(y_i)$ traduz a probabilidade da rede i possuir y_i acidentes em um específico intervalo de tempo e λ_i é o parâmetro de Poisson para a entidade i , a qual é equivalente ao número expectável de acidentes por unidade de tempo $E[y_i]$ deste objeto de estudo. Em outras palavras, a regressão de Poisson é referente a probabilidade do local (segmento ou interseção) i ter y_i acidentes num dado período analisado.

Os seus modelos são dados a partir da estimativa de parâmetros específicos (y_i), números de acidentes para o período, como uma função de variáveis independentes. Sendo $\lambda_i = \text{EXP}(BX_i)$

a maneira funcional mais comum, em que X_i são as variáveis independentes e β são os parâmetros estimados.

A caracterização desta distribuição é dada através de uma média $\mu_i = E[y_i] = \lambda_i$ e variância $Var[y_i] = \lambda_i$, em outros termos, a media e a variância possuem mesmos valores.

2.3.2 - MODELO DE REGRESSÃO BINOMIAL NEGATIVA

Para sobrepujar uma provável sobredispersão nos dados, desenvolveu-se o modelo de regressão Binomial Negativo (BN), sendo uma extensão do modelo de regressão de Poisson. Nesse caso, o modelo BN adota que Poisson acompanha a distribuição com probabilidade gama. Para cada observação, o BN é derivado e reescreve o parâmetro de Poisson como:

$$\lambda_i = e^{(\beta X_i + \varepsilon_i)} \quad (2)$$

Sendo que:

$e^{(\varepsilon_i)}$ - Expressa o erro com distribuição gama, tendo média igual a 1 e variância α .

A adição de $EXP(\varepsilon_i)$ possibilita que a variação não seja igual a média, como $VAR[y_i] = E[y_i] [1 + \alpha E[y_i]] = E[y_i] + \alpha E[y_i]^2$.

A medida que o valor da variância α fica próximo a zero, mais semelhanças o modelo log-linear de Poisson tem com a regressão BN. Isto faz com que a escolha entre qual usar, fica a mercê do valor de α , também designado como parâmetro de sobredispersão.

O parâmetro de sobredispersão é quem dita o nível de sobredispersão da regressão BN. Para os acidentes, geralmente, os valores são demasiados dispersados e, de acordo com Ambros et al. (2018), sua estimativa é dada na modelação juntamente com os demais coeficientes da equação de regressão.

Segundo Lord et al. (2009), a falta de capacidade do modelo BN em tratar os dados subdispersos e as adversidades para determinar os parâmetros de dispersão, quando possuem pequena quantidade de amostragem e baixos valores de médias, é o que caracteriza as restrições do modelo.

2.3.3 - MODELO POISSON-LOGNORMAL

Mesmo possuindo simetria com o modelo BN, eles se diferenciam através do parâmetro Poisson, que tem seu valor dado por $EXP(\varepsilon_i)$ sendo lognormal, ao invés de distribuição gama. Contudo, de acordo com Miaou et al. (2003), mesmo detendo maior maleabilidade que o BN, o

modelo Poisson-lognormal não possui uma formulação fechada, pode ser afetado por amostras de pequenas quantidades e médias com baixos valores, demonstrando desta forma, uma certa limitação.

2.3.4 - MODELO POISSON INFLACIONADO DE ZEROS E BINOMIAL NEGATIVO INFLACIONADO DE ZEROS

Para afrontar a quantidade massiva de zero que possa vir a encontrar no número de acidentes de um banco de dados ou em um modelo BN/Poisson, elaborou-se o modelo com inflação de zeros.

A zona de trabalhabilidade deste modelo parte da ideia de que o excesso de densidade zero é elucidada através de um regime de divisão, vindo a modelar um sistema sem acidentes em oposição a um propenso a acidentes. Além disto, a chance da rede se encontrar numa situação inflacionada de zeros, ou não, pode ser definida por meio de modelos binários probit ou logit (Washington et al., 2010).

De acordo com Shankar et al. (2003), desde o começo da sua aplicação, o seu uso é bem difundido entre os analistas de segurança de transportes, seja para modelos BN ou regressão de Poisson.

2.3.5 - MODELOS DE PARÂMETROS ALEATÓRIO

Os modelos de parâmetros aleatórios almejam entender as diferenças não analisadas entre os locais. Sendo que eles possibilitam que cada parâmetro considerado pelo modelo seja diferente de observação para observação dentro do grupo de dados.

Os parâmetros estimáveis podem ser escritos como $B_i = B + \varphi_i$ para possibilitar a sua aplicação em modelos de dados de contagem. Nisto, φ_i será um termo distribuído aleatoriamente. Portanto, no caso do parâmetro de Poisson (na regressão de Poisson), a adoção dessa equação fará com que se torne $\lambda_i | \varphi_i = \text{EXP}(BX_i)$ e $P(\lambda_i | \varphi_i)$, na BN.

Infelizmente, devido a complexidade para aferir, o modelo pode não ter melhor competência para previsão de acidentes. Além disto, não é possível passar os seus resultados para outros conjuntos de dados, devido ao grau de particularidade das observações (Washington et al., 2010).

2.3.6 - MODELOS MULTINOMIAIS NEGATIVOS

Segundo Guo (1996), a questão da correlação entre as observações pode ser sanada por meio de uma aproximação com multinomial negativa. O que diferencia este modelo do BN é o emprego do EXP (ϵ_i) (da fórmula: $\lambda_i = \text{EXP}(BX_i + \epsilon_i)$), onde este se encontra relacionado a uma

característica específica, ao invés de uma observação particular. Além disto, tal termo ainda continua sendo utilizado para o erro distribuído através da distribuição gama, média 1 e variância α .

Infelizmente, os modelos multinomiais negativos não são uma boa alternativa para retratar subdispersão e encontram-se expostos a problemas, quando esses possuem valores baixos para médias de amostragens e pequenas proporções destas.

2.3.7 - MODELO DE REGRESSÃO GAMA

Para desenvolver a análise de dados subdispersos, Oh et al. (2006) propôs o modelo gama onde a representação tais dados (também aplicável a sobredispersos) fica sujeito ao modelo de Poisson, quando a variância assume valor próximo à média do número de acidentes. Mesmo que este modelo possua boa execução estatística, ele possui uma dualidade, sendo que um destes estados de sua dualidade detém média igual a zero, quando submetida a um longo prazo. Desde que foi introduzido, este modelo apresentou certa limitação.

2.3.8 - MODELO DE EQUAÇÃO DE ESTIMATIVA GENERALIZADA

No âmbito dos acidentes, Lord e Persaud (2000) aplicaram o modelo de equação de estimativa generalizada objetivando modelar dados de colisões que tinham medições replicados. Por si só, a equação não é tida como um modelo de regressão, mas como uma metodologia para prever os modelos que possuem a correlação temporal como característica de seus dados. Segundo Lord e Mahlawat (2009), no que tange o tratamento das relações temporais, o modelo de equação de estimativa generalizada apresenta variadas abordagens.

2.3.9 - MODELOS BIVARIADOS / MULTIVARIADOS

Os modelos bivariados possuem o seu uso voltado para modelar, de forma composta, dois tipos de acidentes. Para casos de tipos de acidentes superiores a dois, tem-se os modelos multivariados: de Poisson, Binomial Negativo e Poissonlognormal (Park et al., 2010).

Estes modelos apresentam-se necessários quando se busca modelar tipos particulares de acidentes, como acidentes que resultaram em feridos com ferimentos graves ou ligeiros, acidentes com danos materiais e/ou mortes, entre outros. Além disto, são modelos que tem em consideração a correlação entre as diferentes magnitudes do acidente (Miaou e Song, 2005). Contudo, a complexidade para determinar esses modelos é o que traduz o seu lado negativo, uma vez que necessitam de formular uma matriz de correlação.

2.3.10 - MODELOS HIERÁRQUICOS / MULTINÍVEIS

A utilização de modelos hierárquicos está voltada para análise dos dados que possuem respostas dentro de clusters hierárquicos como características. O nível estrutural do acidente pode ser abordado partindo de uma perspectiva mais macro, indo para pormenores. Exemplo disto seria ter os acidentes em si como o nível mais baixo e progredindo a medida que vai especificando, como os segmentos onde ocorreram os acidentes, seguido das características do local, da tipologia dos veículos envolvidos e por assim em diante. Tornando assim, possível atribuir correlações entre as hierarquias e observar se há características não trabalhadas a princípio, mas que surtam efeito.

Entretanto, uma rede muito hierarquizada pode fornecer uma baixa qualidade das análises a medida que vai restringindo o número das amostras, o que leva a fracos valores para os coeficientes e erros padrões associados, ainda mais quando é utilizado modelações mais tradicionais (Goldstein, 1995). Mesmo que, segundo Kim et al. (2007), tem havido uma considerável adoção de modelos hierárquicos para acidentes, a interpretação de seus resultados pode ser de caráter difícil, em especial para aqueles que não são estatísticos.

2.3.11 - MODELOS DE MACHINE LEARNING

Além de determinar uma forma funcional entre dois tipos de variáveis (dependentes e independentes), a modelação estatística necessita realizar pressupostos a cerca da distribuição dos dados. Contudo, isto não implica que sejam verdadeiras, fazendo com que as suas admissões gerem estimativas e conclusões errôneas. Partindo disto, tem-se as técnicas de Machine Learning (ML) que por meio das suas redes neurais artificiais não obrigam a existência pré-estipulada do comportamento entre as variáveis, uma vez que o ponto de partida são os dados reais que vão proporcionar uma estrutura mais concisa e funções de modo não lineares (Silva, 2019).

Entretanto, a complexidade envolta nos modelos de rede neural e a não possibilidade de ser replicada em outros bancos de dados, cria um obstáculo para a sua adoção. Além disto, tal modelo pode fornecer parâmetros não viáveis de interpretação, ao contrário dos modelos mais tradicionais (Lord e Mannering, 2010).

2.4 - Elementos do Modelo

2.4.1 - UNIDADE DE OBSERVAÇÃO

Em um trabalho de modelação, a seleção da unidade de observação tem caráter de essencial importância para a sua realização. Tal escolha aponta qual será o ponto de vista que o estudo vai abordar e é o primeiro passo para dar início a recolha dos dados a serem estudados.

Segundo Fridstrøm (2015), para adoção de uma unidade de observação para um acidente, pode-se adotar conforme a tabela 2:

Tabela 2 - Unidades de observação (Autor, 2022)

Pontos	Unidade de observação	Unidade
i	Acidente	valor unitário
ii	Acidente com ferido	valor unitário
iii	Ferido	valor unitário
iv	Vítima num determinado período	valor unitário
v	Vítima envolvida num acidente (com/sem ferimentos)	valor unitário
vi	Condutor envolvido num acidente	valor unitário
vii	Veículo	valor unitário
viii	Acidente por quilómetros	valor unitário
ix	Veículo envolvido num acidente	valor unitário
x	área geográfica num período específico	valor unitário/(ano/mês/semana/dia/hora)
xi	Segmento da rede por determinado período	valor unitário/(ano/mês/semana/dia/hora)
xii	Interseção através de um período específico	valor unitário/(ano/mês/semana/dia/hora)

Como pode-se observar na tabela acima, dos pontos *i* ao *ix*, as unidades representam eventos particulares, podendo ser consideradas como desagregadas. Enquanto dos pontos *x* ao *xii*, são agregadas, ou seja, simbolizam contagens ou médias de um conjunto. Neste trabalho, será abordado o ponto *xi* como unidade de observação, em que tem segmentos da rede por cada ano do intervalo de tempo analisado.

Alguns dos pontos, acima citados, partem do princípio da ocorrência de um acidente (pontos *i*, *ii*, *iii*, *v*, *vi* e *ix*). Entretanto, quando se utiliza um local como unidade de observação, o caso dos pontos tidos como agregados, os valores nulos também serão considerados.

A importância, da consideração dos valores nulos para a contagem de acidentes nas localidades, é caracterizada por proporcionar a comparação entre as situações, com e sem acidentes, e obter conclusões sobre o que influencia a origem do acidente (Fridstrøm, 2015).

2.4.2 - VARIÁVEL DEPENDENTE

A variável dependente, também chamada de variável resposta, deve ser escalar ao invés de categórica por representar contagens e, caso contrário, pode gerar resultados que não possam ser interpretados (Elvik 2010).

Para maior precisão dos resultados gerados pelos modelos, o ideal seria possuir um banco de dados com um extenso número de amostras. Por isto que, também, este estudo considera os valores nulos para o número de acidentes.

2.4.3 - VARIÁVEL INDEPENDENTE

Segundo Reurings et al. (2007), as variáveis independentes podem ser classificadas das seguintes formas:

- Simbolizando exposição ao risco de acidentes;
- Areladas a fatores de risco que auxiliam no episódio de um acidente.

O ideal para a atribuição das variáveis independentes seria de acordo com testagens empíricas e baseado em evidências já retratadas por autores conceituados. Todavia, em diversas situações, a escolha das variáveis explicativas é ditada pela disponibilidade dos dados que a sua zona de estudo pode proporcionar. Tais variáveis, normalmente, abrangem a frequência de passagem dos veículos, os elementos e características dos segmentos estudados (Reurings et al., 2007).

2.4.4 - VARIÁVEIS PARA SEGMENTOS DE RODOVIA

Para o caso dos modelos voltados para os segmentos da rede metroviária, as variáveis utilizadas podem expor as funcionalidades, aspetos físicos e dados de circulação. Tais variáveis são divididas em escalares (ou numéricas) e categóricas para intuito de modelação. Sendo que as numéricas simbolizam uma característica, condição ou parâmetro, sendo valores discretos (Tegge et al., 2010).

Enquanto variáveis categóricas representam ou identificam uma condição específica. No decorrer da modelação, estas variáveis são traduzidas como “dummys” binárias nos distintos cenários possíveis de ocorrerem.

Deve-se destacar que a existência de diversas variáveis não significa melhores resultados. Uma vez que, ao conter muitas variáveis que não representam significância, podem gerar modelos desequilibrados, em outras palavras, o ideal é aplicar o menor número possível de variáveis que melhor ilustra o acidente. Desta forma, proporcionando uma compreensão mais simples e de atualização mais eficaz (Ambros et al., 2016).

Contudo, caso seja omitido uma variável independente que apresenta influência, o modelo apresentará um desvio que, por sua vez, resultará em parâmetros errados que trarão inferências e previsões errôneas a cerca dos acidentes. Para melhor selecionar as variáveis se deve ter em atenção (Mitra e Washington, 2012):

- Significância estatística - em níveis de confiança menores que 95% faz com que seja necessário a exclusão das variáveis; para intervalos de confiança superiores a 99%, a exclusão das variáveis só podem ser feitas mediante a uma análise apurada que justifique.
- Estabilidade do modelo - quando os parâmetros de outras variáveis são alterados quando inseridos ou excluídos uma outra variável, ou seja, quando as variáveis possuem relação uma com as outras.
- Efeito da variável deve ser lógico - a configuração do modelo e os valores de seus parâmetros devem ser coerentes com as noções práticas.
- Proporção do efeito e a facilidade de medição da variável - as variáveis devem informar resultados expressivos e com simples aferição.

2.4.5 - EXPOSIÇÃO

Podendo ser entendida como a parcela de atividades em que sujeita os objetos de observação ao risco, a exposição apresenta relevância para o procedimento de modelação. Para o caso da rede metroviária, em específico quando se trata dos seus segmentos ou linhas como todo, a frequência de passagem dos veículos pode ser dada por médias temporárias que dependem de como será abordado a unidade de observação (Fridstrøm, 2015).

A correlação também pode ser com variáveis que expressam valores referentes a questões espaciais, além de influenciar de modo significativo a análise, como os cruzamentos entre vias e a linha do metro.

Quando se refere aos tratamentos envolvendo os modelos estatísticos, o indicado é buscar evitar trabalhos com variáveis explicativas que não se correlacionam. Praticamente todas as variáveis são correlacionáveis de alguma forma, assim como o banco de dados analisado, por serem uma fração da realidade. Além disto, quando elas apresentarem forte correlação, também terá elevado coeficiente para o erro padrão delas (Fridstrøm, 2015).

Assim sendo, para selecionar variáveis independentes é recomendável retirar aquelas que apresentam situações que sejam menos significativas para a finalidade estudada com o modelo, isto quando existe forte correlação entre os pares de variáveis (Ambros et al., 2018).

2.4.6 - FUNÇÃO DO MODELO

Uma das partes relevantes para o processo de modelação é a forma funcional do modelo, por determinar o vínculo entre as variáveis explicativas e resposta. De acordo com Lord e Mannering (2010), a grande parte dos modelos voltados para a contagem de acidentes adotam que as variáveis independentes instigam a variável dependente de algum modo linear.

O modelo de regressão linear é a maneira funcional comumente utilizada em uma análise multivariada (Ferreira, 2010). Como os valores para os acidentes devem ser impreterivelmente positivos, assim, se deve usar a seguinte função para garantir esta condição:

$$E[Y] = e^{\sum \beta_j x_j} \quad (3)$$

Em que $E[Y]$ corresponde o valor esperado da frequência de acidentes, j representa o número de variáveis independentes, β_j os parâmetros a estimar e x_j as variáveis independentes. Além disto, para linearizar esta função é necessário de uma função logarítmica.

Segundo Ambros et al. (2018), é possível utilizar relações gráficas entre a variável e a frequência de acidentes ou funções integrais, através de meios empíricos, para selecionar a forma matemática mais apropriada para a variável explicativa.

2.4.7 - SOBREDISPERSÃO

A situação de sobredispersão dos dados ocorre quando o valor da variância é superior à média das contagens, o que pode levar a um enviesamento e inconsistência nos parâmetros estimados e, conseqüentemente, acarreta em conclusões incorretas a cerca dos resultados (Lord e Mannering, 2010). Por isto, se deve ter atenção quando ocorrem tais sobredispersões, ainda mais por não ser algo difícil de acontecer. Na realidade, o que é raro de se ter é uma dispersão que não é suficiente, em particular quando se tem pequeno valor para o valor médio da amostra.

Capítulo 3: Metodologia

Neste capítulo são retratados os estágios e processos para desenvolver um modelo adotando uma abordagem de estudo quantitativo, em outras palavras, uma previsão da frequência dos acidentes. A razão disto é em detrimento da relevância que os modelos de previsão de acidentes (MPA) possuem no auxílio da associação dos acidentes com os seus, possíveis, fatores de risco.

O modelo trabalhado neste estudo é voltado para a rede metroviária cuja operação é executada pela Via Porto, sendo que, durante a presente análise, a malha em questão possui 82 estações. No intervalo de tempo tratado nesta laboração teve-se a inauguração de apenas uma estação, VC Fashion Outlet/Modivas (referenciado nos dados como Modivas Norte) em 27 de julho de 2017. A proposta deste trabalho é a realização de uma investigação exploratória, através da regressão de Poisson e análise de Cluster, sendo objetivado os locais (estações e troços entre estações) na ocorrência de MPA para a rede do Metro do Porto. A análise Cluster classifica as amostras em grupos, de forma que dentro de cada grupo os seus elementos são muito parecidos e os grupos sejam distintos entre si, fazendo com que seja possível resumir as informações nestes grupos e realizar interpretações sobre o que caracteriza cada um.

Ainda, no presente capítulo, é realizada a identificação das etapas de elaboração do trabalho, seguidamente, com a identificação da área de estudo, com sua sucessiva descrição e análise dos dados empregados na modelação. Mais adiante, é descrito as etapas de separação e escolha das variáveis. Por fim, é detalhado os resultados dos modelos aplicados, com sua respectiva avaliação de desempenho e possíveis execuções práticas na zona de estudo.

3.1 - Definição da Área de Estudo

No primeiro momento do trabalho, o foco estava voltado para a elucidação dos objetivos e posicionamento do tema, no qual tem a inclusão da revisão bibliográfica.

Faz-se necessário a designação da zona a ser estudada para realizar o desenvolvimento do modelo. Os fatores levados em consideração para a escolha do observador em análise foram os atributos técnicos e operacionais dos locais, o tipo e número de acidentes, assim como a sua ocorrência no tempo.

A rede do metro na cidade do Porto foi dividida da seguinte forma para este trabalho:

- Linha A:

Código	Local
SMT	Senhor de Matosinhos
SMT - MRC	Senhor de Matosinhos - Mercado
MRC	Mercado
MRC - BRI	Mercado - Brito Capelo
BRI	Brito Capelo
BRI - MSU	Brito Capelo - Matosinhos Sul
MSU	Matosinhos Sul
MSU - CMM	Matosinhos Sul - Câmara de Matosinhos
CMM	Câmara de Matosinhos
CMM - PDR	Câmara de Matosinhos - Parque Real
PDR	Parque de Real
PDR - HSP	Parque Real - Hospital pedro hispano
HSP	Hospital Pedro Hispano
HSP - MAR	Hospital Pedro Hispano - Estádio do Mar
MAR	Estádio do Mar
MAR - VSC	Estádio do Mar - Vasco da Gama
VSC	Vasco da Gama
VSC - SHR	Vasco da Gama - Senhora da Hora

Figura 5 - Estações e troços entre estações da linha A (Autor, 2022)

- Linha B:

Código	Local
PVZ	Póvoa de Varzim
PVZ - SBR	Póvoa de Varzim - São Brás
SBR	São Brás
SBR - PFR	São Brás - Portas Fronhas
PFR	Portas Fronhas
PFR - ALT	Portas Fronhas - Alto de Pêga
ALT	Alto de Pêga
ALT - VDC	Alto de Pêga - Vila do Conde
VDC	Vila do Conde
VDC - SCL	Vila do Conde - Santa Clara
SCL	Santa Clara
SCL - AZR	Santa Clara - Azurara
AZR	Azurara
AZR - ARV	Azurara - Árvore
ARV	Árvore
ARV - VRZ	Árvore - Varziela
VRZ	Varziela
VRZ - NTZ	Varziela - Espaço Natureza
NTZ	Espaço Natureza
NTZ - MIN	Espaço Natureza - Mindelo
MIN	Mindelo
MIN - MON	Mindelo - Mondivas Norte
MON	Modivas Norte
MON - MOC	Mondivas Norte - Mondivas Centro
MOC	Modivas Centro
MOC - MOS	Modivas Centro - Modivas Sul
MOS	Modivas Sul
MOS - VDP	Modivas Sul - Vilar do Pinheiro
VDP	Vilar do Pinheiro
VDP - LDD	Vilar do Pinheiro - Lidador
LDD	Lidador
LDD - RBR	Lidador - Pedras Rubras
RBR	Pedras Rubras
RBR - VRD	Pedras Rubras - Verdes
VRD	Verdes
VRD - CRS	Verdes - Crestins
CRS	Crestins
CRS - ESP	Crestins - Esposade
ESP	Esposade
ESP - COI	Esposade - Custóias
COI	Custóias
COI - CUC	Custóias - Fonte do Cuco
CUC	Fonte do Cuco
CUC - SHR	Fonte do Cuco - Senhora da Hora
MIN - MOC	Mindelo - Mondivas Centro

Figura 6 - Estações e troços entre estações da linha B (Autor, 2022)

- Linha C:

Código	Local
ISM	ISMAI
ISM - CST	ISMAI - Castelo da Maia
CST	Castelo da Maia
CST - MDM	Castelo da Maia - Mandim
MDM	Mandim
MDM - ZIN	Mandim - Zona Industrial
ZIN	Zona Industrial
ZIN - FRM	Zona Industrial - Fórum Maia
FRM	Fórum Maia
FRM - PDM	Fórum Maia - Parque da Maia
PDM	Parque Maia
PDM - CIO	Parque Maia - Custió
CIO	Custió
CIO - ARJ	Custió - Araújo
ARJ	Araújo
ARJ - PIA	Araújo - Pias
PIA	Pias
PIA - CDR	Pias - Cândido dos Reis
CDR	Cândido dos Reis
CDR - CUC	Cândido dos Reis - Fonte do Cuco

Figura 7 - Estações e troços entre estações da linha C (Autor, 2022)

- Linha D:

Código	Local
HSJ	Hospital São João
HSJ - IPO	Hospital São João - IPO
IPO	IPO
IPO - PUN	IPO - Polo Universitário
PUN	Polo Universitário
PUN - SAL	Pólo Universitário - Salgueiros
SAL	Salgueiros
SAL - CMB	Salgueiros - Combatentes
CMB	Combatentes
CMB - MRQ	Combatentes - Marquês
MRQ	Marquês
MRQ - FGM	Marquês - Faria Guimarães
FGM	Faria Guimarães
FGM - TRD_INF	Faria Guimarães - Trindade Inferior
TRD_INF	Trindade Inferior
TRD_INF - ALD	Trindade Inferior - Aliados
ALD	Aliados
ALD - SBT	Aliados - São Bento
SBT	São Bento
SBT - JRD	São Bento - Jardim do Morro
JRD	Jardim do Morro
JRD - GTR	Jardim do Morro - General Torres
GTR	General Torres
GTR - CMG	General Torres - Câmara de Gaia
CMG	Câmara de Gaia
CMG - JDS	Câmara Gaia - João de Deus
JDS	João de Deus
JDS - DJ2	João de Deus - D. João II
DJ2	D. João II
DJ2 - SOV	D. João II - Santo Ovídio
SOV	Santo Ovídio

Figura 8 - Estações e troços entre estações da linha D (Autor, 2022)

- Linha E:

Código	Local
AER	Aeroporto
AER - BTC	Aeroporto - Botica
BTC	Botica
BTC - VRD	Botica - Verdes

Figura 9 - Estações e troços entre estações da linha E (Autor, 2022)

- Linha F:

Código	Local
DRG - CTM	Estádio do Dragão - Contumil
CTM	Contumil
CTM - NSN	Contumil - Nasoni
NSN	Nasoni
NSN - VIT	Nasoni - Nau Vitória
VIT	Nau Vitória
VIT - LEV	Nau Vitória - Levada
LEV	Levada
LEV - RIO	Levada - Rio Tinto
RIO	Rio Tinto
RIO - CPI	Rio Tinto - Campainha
CPI	Campainha
CPI - BAG	Campainha - Baguim
BAG	Baguim
BAG - CAR	Baguim - Carreira
CAR	Carreira
CAR - VND	Carreira - Venda Nova
VND	Venda Nova
VND - FZR	Venda Nova - Fânzeres
FZR	Fânzeres

Figura 10 - Estações e troços entre estações da linha E (Autor, 2022)

- Tronco Comum:

Código	Local
SHR	Senhora da Hora
SHR - 7BC	Senhora da Hora - Sete Bicas
7BC	Sete Bicas
7BC - VSO	Sete Bicas - Viso
VSO	Viso
VSO - RMA	Viso - Ramalde
RMA	Ramalde
RMA - FRC	Ramalde - Francos
FRC	Francos
FRC - CDM	Francos - Casa da Música
CDM	Casa da Música
CDM - MIC	Casa da Música - Carolina Michaelis
MIC	Carolina Michaelis
MIC - LPA	Carolina Michaelis - Lapa
LPA	Lapa
LPA - TRD_SUP	Lapa - Trindade Superior
TRD_SUP	Trindade Superior
TRD_SUP - BLH	Trindade Superior - Bolhão
BLH	Bolhão
BLH - 24A	Bolhão - Campo 24 Agosto
24A	Campo 24 de Agosto
24A - HRS	Campo 24 Agosto - Heroísmo
HRS	Heroísmo
HRS - CPN	Heroísmo - Campanhã
CPN	Campanhã
CPN - DRG	Campanhã - Estádio do Dragão
DRG	Estádio do Dragão

Figura 10 - Estações e troços entre estações do Tronco Comum (Autor, 2022)

A distribuição da rede pode ser vista na figura 11:

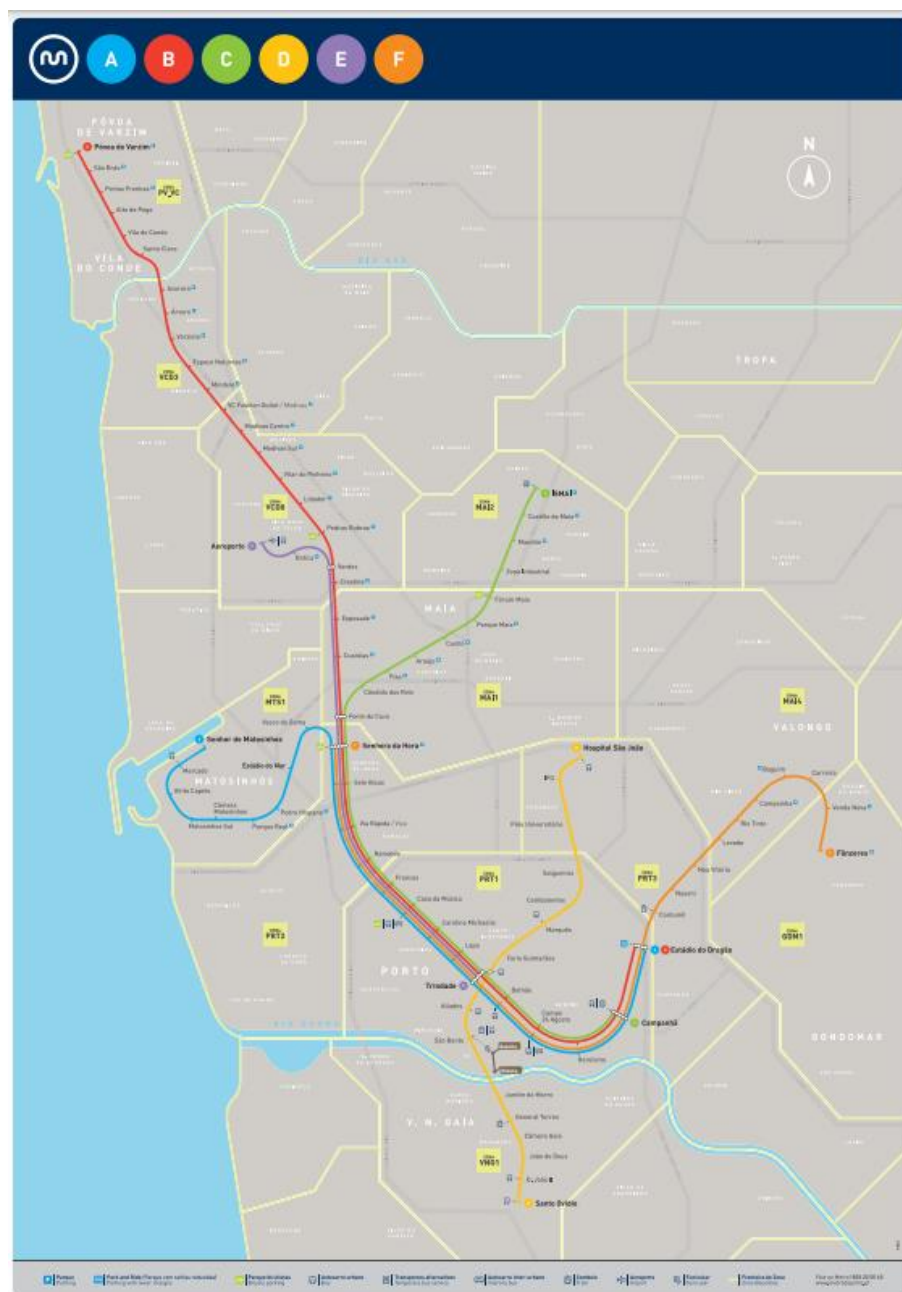


Figura 11 - Mapa da rede metroviária do Porto (Metro do Porto, 2020)

A extensão das linhas do metro são: 15,6 km para a linha A, 33,6 km para a linha B, 19,6 km para a linha C, 8,5 km para a linha D, 12,9 km para a linha E e 16,4 km para a linha F. Sendo que nas linhas A e C também operam serviços com percurso reduzido (A - Senhor de Matosinhos até Trindade; C - Campanhã até Fórum Maia). Além disso, também há o serviço expresso da linha B e a redução da linha E em 2019 (antigamente operava até o Estádio do Dragão), finalizando o serviço em Trindade, desde então.

Para desenvolver a investigação a cerca da sinistralidade foi considerado o número de acidentes nos locais observados por ano de 2012 a 2020, levando em conta o fator que gerou tal acidente, desconsiderando o resultado causado pela ocorrência. Através disto, almeja-se

compreender as localidades que podem ser classificadas como pontos negros da rede e os fatores que tem significância para suceder a casualidade.

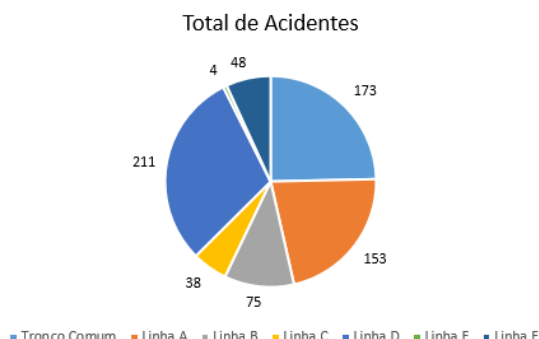


Figura 12 - Total de acidentes em números globais, 2012 - 2020 (Autor, 2022)

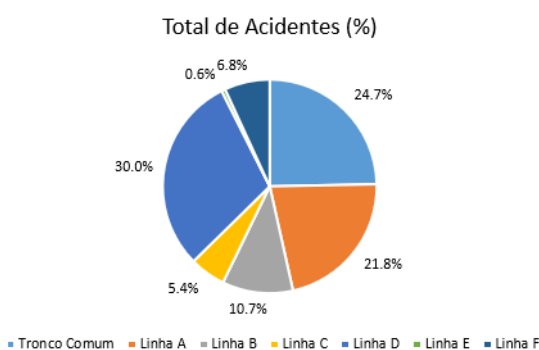


Figura 13 - Total de acidentes em percentagem, 2012 - 2020 (Autor, 2022)

Tabela 02 - Tipos de acidentes nos intervalo de 2012 a 2020 (Autor, 2022)

Ano	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	Total	Total (%)
Colisões	19	19	25	35	19	20	18	25	9	189	26,8%
Acidentes c/ Clientes no Veículo	37	45	40	38	38	51	42	62	41	394	56,2%
Acidentes c/ Peões	10	11	16	11	11	14	10	22	8	113	16,1%
Descarrilamentos / Colisão + Descarr.	0	1	0	0	0	0	1	0	4	6	0,9%
Total Acidentes	66	76	81	84	68	85	70	109	62	701	

Ao observar a figura 12 e 13, é possível destacar que a linha D possui a maior fração dos acidentes totais, com 210 (30,0%), subsequente o Tronco Comum com 173 (24,7%) e linha A com 153 (21,8%). E ao voltar a atenção para a tabela 2 acima, pode-se ver que apenas 42,9% (colisões e acidente c/ peões) dos acidentes da rede são tidos como amostras para este trabalho. Isto acontece em detrimento das observações a cerca dos acidentes envolvendo os clientes dentro dos veículos do metro, onde podem ser separados em quedas nas linhas ou acidentes com as portas dos veículos do metro. Tendo esta separação em mente, os possíveis fatores que levaram a esse tipo de acidente são muito subjetivos, uma vez que seria necessário uma descrição dos eventos que não existia nos formulários anteriores a 2018 (as amostras de 2018, 2019 e 2020 são insuficientes para ter essa tipologia de acidente em consideração).

Também foram investigadas as informações a cerca da frequência média anual de cada linha da rede. Tendo então a média, para fins de conhecimento, da média da frequência anual referente ao período de estudo, como é possível observar na tabela 3.

Tabela 3 - Frequência média diária anual de passagem de veículos/linha, 2012 - 2020 (Autor, 2022)

Linhas	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
A	100.0	100.0	100.0	103.9	100.0	100.0	98.9	98.9	40.6
B	62.4	63.3	62.5	56.2	52.8	57.8	80.8	75.8	34.8
C	120.9	138.8	122.4	118.6	108.8	87.3	127.4	133.9	33.4
D	43.4	92.9	86.4	107.6	83.1	79.7	83.4	101.7	71.6
E	70.9	54.4	58.7	58.7	55.5	48.7	44.4	64.0	21.0
F	70.9	54.4	70.9	70.9	70.9	70.9	70.9	65.7	33.4

Para a aplicação dos modelos de previsão de acidentes é importante ressaltar que as quantidades do número de amostras trabalhadas apresentem relevância para análise estatística. Assim sendo, o maior volume de eventos a serem retratados, em questão os locais no intervalo estudado, implica num maior entendimento estatístico dos acontecimentos. A partir disto e levando em consideração a frequência média no período analisado, ou seja, o grau de exposição a novos acidentes, é de notar que na linha D possui maior volume de acidentes mesmo que não detenha a maior exposição da rede. Além disto, a linha amarela é a menor linha da rede em extensão (8,5 km) e, aproximadamente, 30% desse comprimento se encontra vedado e subterrâneo (Metro do Porto, 2017), enquanto a maior linha (linha B com 33,6 km) possui 10,7% da totalidade dos acidentes. Tal facto faz com que seja intrigante a análise dos fatores que possam contribuir para a origem das casualidades.

Com isso, é de imaginar que, para além da frequência, há outros fatores que tem seus contributos para acontecer um acidente, como por exemplo o comprimento dos segmentos, mostrando que uma ocorrência não é dada por um fator único. A partir disto, é de salientar a importância da análise dos outros possíveis contributos para as casualidades, as características dos locais que provavelmente tem relevância.

3.2 - Recolha e Tratamento de Dados

Neste estágio o foco é voltado para a identificação das informações à disposição e sua formatação para, então, um seguinte tratamento de dados direcionado a análise exploratória deles. Para isto, teve-se a filtragem das informações para possibilitar caracterização das variáveis independentes e atribuir a base de dados ao estudo, estando focada na elaboração dos modelos.

Os elementos adotados são referentes às informações sobre o número de acidentes, a frequência dos veículos e a infraestrutura que compõe a rede metroviária do Porto. Depois da

obtenção destes dados foi preciso realizar a organização e tratamento dessas, sendo descrito a seguir.

3.2.1 - DADOS DO NÚMERO DE ACIDENTES

Inicialmente foi necessário avaliar a qualidade dos registros, tipos e número de acidentes para prosseguir com o método de modelação da segurança. Através disto deu-se a viabilidade na decisão da estratégia adotada para filtrar, tratar e usar os dados das linhas do metro para fazer o banco de dados e, assim, poder avançar com o modelo.

Para tal estudo foi atribuído os acidentes referentes aos anos de 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019 e 2020. Nas figuras 12 e 13 tem-se a representação gráfica da totalidade dos acidentes na área de estudo no intervalo de tempo considerado. O número total de registros considerados como acidentes pela Via Porto nesta janela de tempo é de 701, mas de acordo com o mencionado anteriormente, serão considerados apenas 302 amostras do banco de dados da Via Porto (referente as colisões e acidente c/ peões).

A partir disto é de destacar o ano de 2019 como sendo aquele de maior número de acidentes. Na tabela 4 tem o desmembramento do valor total das casualidades dos três anos de maiores incidências nas diferentes tipologias empregadas pela Via Porto para a classificação das ocorrências.

Tabela 4 - Valor de cada tipologia dos acidentes nos 3 anos de maior incidência (Autor, 2022)

Acid.Circ	2015	2017	2019
Colisões	35	20	25
Acidentes c/ Clientes no Veículo	38	51	62
Acidentes c/ Peões	11	14	22
Descarrilamentos / Colisão + Descarr.	0	0	0
Total Acidentes	84	85	109

Ao analisar, e excluir “Acidentes c/ Clientes no Veículo”, os dois tipos de acidentes no ano de maior de recorrência, ano de 2019, é possível perceber que aqueles que acontecem com maior frequência são os que envolvem os veículos do metro em colisões com veículos terceiros e em acidentes com peões, representando 22,9% e 20,2%, respetivamente, da totalidade do ano em questão.

Ao ter conhecimento dos dois tipos de acidentes que acontecem com maior frequência durante a operação do metro é viável uma observação temporal deles. A tabela 5 apresenta o número de colisões do metro com veículos terceiros e acidentes do metro com peões na série histórica considerada.

Tabela 5 - Totais de acidentes de colisão e atropelamento de peões por ano, 2012-2020 (Autor, 2022)

Ano	Colisões	Acidentes c/ Peões
2012	19	10
2013	19	11
2014	25	16
2015	35	11
2016	19	11
2017	20	14
2018	18	10
2019	25	22
2020	9	8
Total	189	113

Como se pode observar a tabela acima, os valores das colisões, geralmente, ficam ao entorno de 19 acidentes com alguns anos atípicos com valores mais elevados (2014, 2015 e 2019). Enquanto os acidentes envolvendo peões tem valores em volta de 11 acidentes, com exceção de 2014 e 2019 que tem valores mais elevados. Os valores referentes ao ano de 2020 dá-se em detrimento da reduzida operação causada pelas restrições imposta para controlar o vírus SARS-CoV-2.

Devido a dimensão dos valores existentes na área de estudo, número de amostragens, é inviável um estudo pormenorizado voltado a destrinçar os dados, a fim de ter conhecimento a respeito de indicadores de sinistralidade como a gravidade dos ferimentos das pessoas envolvidas (graves, ligeiros ou sem ferimentos), percas materiais e tipologia dos veículos envolvidos.

O processo de registo das ocorrências passou por alterações desde o início da operação do metro, possuindo formatação semelhante ao da data do presente trabalho, a partir de 2012. A partir de 2018, foi atribuído um campo para fazer uma observação a respeito de quem seria o responsável pelo acidente e a ação praticada pelo mesmo. A sugestão sugerida é, além do já implementado, atribuir o estado em que se encontra as pessoas envolvidas no acidente, como se apresentam sinais de embriaguez ou alguma perturbação. A fim de traçar o perfil das pessoas que geralmente envolvem-se nestes acidentes e realizar campanhas para minimizar tais ocorrências.

3.2.2 - DADOS DA FREQUÊNCIA DE PASSAGEM DE VEÍCULOS DO METRO

A fim de ter conhecimento sobre o grau de exposição dos veículos do metro aos acidentes, foi utilizado neste trabalho a frequência média diária anual das linhas na série histórica de 2012 a 2020, representados nas tabelas a seguir:

Tabela 6 - Frequência média diária anual - dias úteis, sábado e domingo, linha A de 2012 a 2020 (Autor, 2022)

Linha	Ano	Útil	Sábado	Domingo
A	2012	102	100	90
A	2013	102	100	90
A	2014	102	100	90
A	2015	105	107,5	94,5
A	2016	102	100	90
A	2017	102	100	90
A	2018	102	100	82
A	2019	102	100	82
A	2020	52,6	10,5	10,5

Tabela 7 - Frequência média diária anual - dias úteis, sábado e domingo, linha B de 2012 a 2020 (Autor, 2022)

Linha	Ano	Útil	Sábado	Domingo
B	2012	38	38	38
B	2013	38	38	38
B	2014	38	38	38
B	2015	38	38	38
B	2016	38	19	38
B	2017	38	25,5	31,5
B	2018	38	38	34,5
B	2019	27	34,5	27
B	2020	27,2	5,4	5,4
Bx	2012	31	11	5
Bx	2013	29,75	19,5	8,5
Bx	2014	29,75	12	11
Bx	2015	19,25	18	13
Bx	2016	20,75	12	7
Bx	2017	25,75	24	5
Bx	2018	52,5	24,5	16
Bx	2019	52,5	30	41,5
Bx	2020	19,4	0,0	0,0

Tabela 8 - Frequência média diária anual - dias úteis, sábado e domingo, linha C de 2012 a 2020 (Autor, 2022)

Linha	Ano	Útil	Sábado	Domingo
C_CMP-ISMAI	2012	123	23	24
C_CMP-ISMAI	2013	60,5	33,5	28
C_CMP-ISMAI	2014	41,5	19	38
C_CMP-ISMAI	2015	33,5	25	19
C_CMP-ISMAI	2016	32,5	30	19
C_CMP-ISMAI	2017	28,5	29	19
C_CMP-ISMAI	2018	38,5	29	35
C_CMP-ISMAI	2019	32,5	35	29
C_CMP-ISMAI	2020	44,6	5,4	5,4
C_CMP-FOR	2012	32	0	24
C_CMP-FOR	2013	98,5	70	45
C_CMP-FOR	2014	95	72	45
C_CMP-FOR	2015	98	79,5	49,5
C_CMP-FOR	2016	95	13	62
C_CMP-FOR	2017	69	14,5	61
C_CMP-FOR	2018	89	117,5	72,5
C_CMP-FOR	2019	124,5	22,5	65,5
C_CMP-FOR	2020	0	0	0

Tabela 9 - Frequência média diária anual - dias úteis, sábado e domingo, linha D de 2012 a 2020 (Autor, 2022)

Linha	Ano	Útil	Sábado	Domingo
D	2012	52	38	6
D	2013	101	82	63
D	2014	92	82	63
D	2015	114	95,5	87,5
D	2016	91	66,5	60,5
D	2017	85	76	57
D	2018	85	82	77
D	2019	102	101	101
D	2020	94,4	14,3	14,3

Tabela 10 - Frequência média diária anual - dias úteis, sábado e domingo, linha E de 2012 a 2020 (Autor, 2022)

Linha	Ano	Útil	Sábado	Domingo
E	2012	80	51	45
E	2013	59	44,5	41,5
E	2014	65	44,5	41,5
E	2015	65	44,5	41,5
E	2016	65	19	44,5
E	2017	47,5	59	44,5
E	2018	47	38	38
E	2019	64	64	64
E	2020	27,2	5,4	5,4

Tabela 11 - Frequência média diária anual - dias úteis, sábado e domingo, linha F de 2012 a 2020 (Autor, 2022)

Linha	Ano	Útil	Sábado	Domingo
F	2012	80	51	45
F	2013	59	44,5	41,5
F	2014	80	51	45
F	2015	80	51	45
F	2016	80	51	45
F	2017	80	51	45
F	2018	80	51	45
F	2019	73	51	44
F	2020	44,6	5,4	5,4

Vale ressaltar, novamente, que a oscilação presente no ano de 2020 é devido a um evento imprevisível, a pandemia do vírus SARS-CoV-2.

Os valores obtidos nas tabelas anteriores foram baseados no mapa de ofertas da rede. Tendo atenção aos dois tipos de horários que podem ter no ano, horário de verão e de inverno. Referente ao horário de verão, seu início é dado no último domingo do mês de março e seu fim no último domingo do mês de outubro. Também se teve atenção aos diferentes fins de serviço que a operação pode ter, como o caso das linhas A, B e C, além da alteração da linha E, anteriormente mencionado.

Enquanto a tabela 12 representa a frequência dos veículos nos locais onde ofertam essas linhas. Sendo que “C” é a somatória dos valores referentes às ofertas de “C_CMP-ISMAI” e “C_CMP-FOR” e “B” a soma de “B’” e “Bx”.

Tabela 12 - Frequência média diária anual nos locais em que passam as seguintes linhas, 2012-2020 (Autor, 2022)

Linhas	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
A	100.0	100.0	100.0	103.9	100.0	100.0	98.9	98.9	40.6
B´	38.0	38.0	38.0	38.0	35.3	35.3	37.5	28.1	21.9
Bx	24.4	25.3	24.5	18.2	17.5	22.5	43.3	47.7	12.9
B	62.4	63.3	62.5	56.2	52.8	57.8	80.8	75.8	34.8
C_CMP-ISMAI	94.6	52.0	37.8	30.2	30.2	27.2	36.6	32.4	33.4
C_CMP-FOR	26.3	86.8	84.6	88.4	78.6	60.1	90.7	101.5	0.0
C	120.9	138.8	122.4	118.6	108.8	87.3	127.4	133.9	33.4
D	43.4	92.9	86.4	107.6	83.1	79.7	83.4	101.7	71.6
E	70.9	54.4	58.7	58.7	55.5	48.7	44.4	64.0	21.0
F	70.9	54.4	70.9	70.9	70.9	70.9	70.9	65.7	33.4
B,E	133.3	117.7	121.3	114.9	108.3	106.5	125.2	139.8	55.8
B,E,C	254.1	256.5	243.6	233.5	217.1	193.8	252.6	273.6	89.1
A,B,F	233.3	217.7	233.4	230.9	223.7	228.7	250.5	240.4	108.7
A,B,C,F	354.1	356.5	355.8	349.5	332.5	316.0	377.9	374.2	142.1

3.2.3 - DADOS DA INFRAESTRUTURA

Para ter melhor percepção dos possíveis fatores contribuintes para um acidente foi necessário estudar as características que compõe os locais em que as estações e troços entre estações estão inseridos, assim como a região ao seu redor. Sendo que as informações coletadas foram todas numa perspetiva em planta, através de observações aéreas e análises visuais das localidades.

A malha metroviária considerada no presente trabalho é dividida em estações e entre estações (troços), com características geométricas consideradas como constantes ao longo do tempo. O número de estações sofreu uma alteração em 2017, após a inauguração de uma nova estação em julho deste ano, passando de um total de 82 para 83. Com isto, também alteração no número de troços, passando de 80 para 81 (exceção do ano 2017 que foi adotado 82, por motivos de transição).

Nas tabelas a seguir há a representação de todas as estações e troços, assim como as linhas que por eles passando (na data do presente trabalho) e as suas extensões (aproximações a partir de medições realizadas por satélite).

Para este estudo foram extraídos dados a respeito da caracterização das partes que compõe a rede do metro, ou seja, o que foi gerado no procedimento de segmentação da rede que desenrolar-se-á na secção 3.4. Tais informações tem sua descrição a seguir:

Tabela 13 - Segmentos e suas características geométricas, 2020 (Autor, 2022)

Linha		Local	Vedação	Estação	Túnel	Ocupa. Solo	Nº Cruzam.	Larg. (m)	Comp. (m)
A	SMT	Senhor de Matosinhos	Não	Sim	Não	Indústria	0	12	95
A	SMT - MRC	Senhor de Matosinhos - Mercado	Não	Não	Não	Indústria	4	68,91	705
A	MRC	Mercado	Não	Sim	Não	Comércio e Serviços	0	12	95
A	MRC - BRI	Mercado - Brito Capelo	Não	Não	Não	Mista	4	6,69	485
A	BRI	Brito Capelo	Não	Sim	Não	Mista	0	12	95
A	BRI - MSU	Brito Capelo - Matosinhos Sul	Não	Não	Não	Mista	3	12,63	545
A	MSU	Matosinhos Sul	Não	Sim	Não	Mista	0	12	95
A	MSU - CMM	Matosinhos Sul - Câmara de Matosinhos	Não	Não	Não	Mista	7	28,51	615
A	CMM	Câmara de Matosinhos	Não	Sim	Não	Mista	0	12	95
A	CMM - PDR	Câmara de Matosinhos - Parque Real	Não	Não	Não	Residencial	6	27,27	720
A	PDR	Parque de Real	Não	Sim	Não	Mista	0	12	95
A	PDR - HSP	Parque Real - Hospital Pedro Hispano	Não	Não	Não	Campo	1	20,7	655
A	HSP	Hospital Pedro Hispano	Não	Sim	Não	Residencial	0	12	95
A	HSP - MAR	Hospital Pedro Hispano - Estádio do Mar	Não	Não	Não	Comércio e Serviços	4	31,16	790
A	MAR	Estádio do Mar	Não	Sim	Não	Residencial	0	12	95
A	MAR - VSC	Estádio do Mar - Vasco da Gama	Não	Não	Não	Residencial	4	26,12	660
A	VSC	Vasco da Gama	Não	Sim	Não	Residencial	0	12	95
A	VSC - SHR	Vasco da Gama - Senhora da Hora	Não	Não	Não	Residencial	4	29,32	820
B	PVZ	Póvoa de Varzim	Não	Sim	Não	Mista	0	12	95
B	PVZ - SBR	Póvoa de Varzim - São Brás	Não	Não	Não	Mista	2	28,23	620
B	SBR	São Brás	Não	Sim	Não	Mista	0	12	95
B	SBR - PFR	São Brás - Portas Fronhas	Não	Não	Não	Campo	0	6,8	630
B	PFR	Portas Fronhas	Não	Sim	Não	Campo	0	12	95
B	PFR - ALT	Portas Fronhas - Alto de Pêga	Não	Não	Não	Mista	4	26,93	600
B	ALT	Alto da Pêga	Não	Sim	Não	Mista	0	12	95
B	ALT - VDC	Alto de Pêga - Vila do Conde	Não	Não	Não	Campo	2	26,84	765
B	VDC	Vila do Conde	Não	Sim	Não	Campo	0	12	95
B	VDC - SCL	Vila do Conde - Santa Clara	Não	Não	Não	Campo	0	17,49	660
B	SCL	Santa Clara	Não	Sim	Não	Residencial	0	12	95
B	SCL - AZR	Santa Clara - Azurara	Não	Não	Não	Campo	4	23,14	1230
B	AZR	Azurara	Sim	Sim	Não	Campo	0	100	95
B	AZR - ARV	Azurara - Árvore	Sim	Não	Não	Campo	0	100	660
B	ARV	Árvore	Sim	Sim	Não	Campo	0	100	95

Tabela 14 - Segmentos e suas características geométricas, 2020 (Autor, 2022)

Linha		Local	Vedação	Estação	Túnel	Ocupa. Solo	Nº Cruzam.	Larg. (m)	Comp. (m)
B	ARV - VRZ	Árvore - Varziela	Sim	Não	Não	Campo	0	100	862
B	VRZ	Varziela	Não	Sim	Não	Indústria	0	12	95
B	VRZ - NTZ	Varziela - Espaço Natureza	Sim	Não	Não	Indústria	0	100	1540
B	NTZ	Espaço Natureza	Sim	Sim	Não	Campo	0	100	95
B	NTZ - MIN	Espaço Natureza - Mindelo	Sim	Não	Não	Campo	0	100	775
B	MIN	Mindelo	Sim	Sim	Não	Residencial	0	100	95
B	MIN - MON	Mindelo - Mondivas Norte	Sim	Não	Não	Campo	1	24,81	1830
B	MON	Modivas Norte	Sim	Sim	Não	Comércio e Serviços	0	100	95
B	MON - MOC	Mondivas Norte - Mondivas Centro	Sim	Não	Não	Campo	1	28,48	855
B	MOC	Modivas Centro	Sim	Sim	Não	Campo	0	100	95
B	MOC - MOS	Modivas Centro - Modivas Sul	Sim	Não	Não	Campo	0	100	1050
B	MOS	Modivas Sul	Sim	Sim	Não	Campo	0	100	95
B	MOS - VDP	Modivas Sul - Vilar do Pinheiro	Sim	Não	Não	Campo	1	30,15	2040
B	VDP	Vilar do Pinheiro	Não	Sim	Não	Campo	0	12	95
B	VDP - LDD	Vilar do Pinheiro - Lidador	Sim	Não	Não	Campo	0	100	1990
B	LDD	Lidador	Sim	Sim	Não	Residencial	0	100	95
B	LDD - RBR	Lidador - Pedras Rubras	Sim	Não	Não	Campo	1	8,3	1150
B	RBR	Pedras Rubras	Não	Sim	Não	Residencial	0	12	95
B	RBR - VRD	Pedras Rubras - Verdes	Sim	Não	Não	Campo	1	7,04	950
B,E	VRD	Verdes	Não	Sim	Não	Campo	0	12	95
B,E	VRD - CRS	Verdes - Crestins	Sim	Não	Não	Campo	0	100	595
B,E	CRS	Crestins	Sim	Sim	Não	Campo	0	100	95
B,E	CRS - ESP	Crestins - Esposade	Sim	Não	Não	Campo	0	100	2030
B,E	ESP	Esposade	Sim	Sim	Não	Campo	0	100	95
B,E	ESP - COI	Esposade - Custóias	Sim	Não	Não	Campo	0	100	1780
B,E	COI	Custóias	Sim	Sim	Não	Residencial	0	100	95
B,E	COI - CUC	Custóias - Fonte do Cuco	Sim	Não	Não	Residencial	0	16,63	695
B,C,E	CUC	Fonte do Cuco	Não	Sim	Não	Residencial	0	12	95
B,C,E	CUC - SHR	Fonte do Cuco - Senhora da Hora	Não	Não	Não	Residencial	0	26,55	675
B	MIN - MOC	Mindelo - Mondivas Centro	Sim	Não	Não	Campo	2	26,65	2780

Tabela 15 - Segmentos e suas características geométricas, 2020 (Autor, 2022)

Linha		Local	Vedação	Estação	Túnel	Ocupa. Solo	Nº Cruzam.	Larg. (m)	Comp. (m)
C	ISM	ISMAI	Sim	Sim	Não	Comércio e Serviços	0	100	95
C	ISM - CST	ISMAI - Castelo da Maia	Sim	Não	Não	Residencial	1	11,76	705
C	CST	Castêlo da Maia	Sim	Sim	Não	Mista	0	100	95
C	CST - MDM	Castêlo da Maia - Mandim	Sim	Não	Não	Campo	0	100	1460
C	MDM	Mandim	Não	Sim	Não	Comércio e Serviços	0	12	95
C	MDM - ZIN	Mandim - Zona Industrial	Não	Não	Não	Indústria	0	24,29	1180
C	ZIN	Zona Industrial	Sim	Sim	Sim	Indústria	0	100	80
C	ZIN - FRM	Zona Industrial - Fórum Maia	Não	Não	Não	Mista	3	31,31	1140
C	FRM	Fórum Maia	Não	Sim	Não	Mista	0	12	95
C	FRM - PDM	Fórum Maia - Parque da Maia	Não	Não	Não	Mista	4	13,98	820
C	PDM	Parque Maia	Sim	Sim	Não	Campo	0	100	95
C	PDM - CIO	Parque Maia - Custió	Sim	Não	Não	Campo	0	100	1420
C	CIO	Custiô	Sim	Sim	Não	Campo	0	100	95
C	CIO - ARJ	Custiô - Araújo	Sim	Não	Não	Campo	0	100	655
C	ARJ	Araújo	Sim	Sim	Não	Campo	0	100	95
C	ARJ - PIA	Araújo - Pias	Sim	Não	Não	Mista	1	8,42	1250
C	PIA	Pias	Sim	Sim	Não	Residencial	0	100	95
C	PIA - CDR	Pias - Cândido dos Reis	Sim	Não	Não	Campo	0	100	920
C	CDR	Cândido dos Reis	Sim	Sim	Não	Campo	0	100	95
C	CDR - CUC	Cândido dos Reis - Fonte do Cuco	Sim	Não	Não	Campo	0	100	935

Tabela 16 - Segmentos e suas características geométricas, 2020 (Autor, 2022)

Linha		Local	Vedação	Estação	Túnel	Ocupa. Solo	Nº Cruzam.	Larg. (m)	Comp. (m)
D	HSJ	Hospital São João	Não	Sim	Não	Comércio e Serviços	0	12	95
D	HSJ - IPO	Hospital São João - IPO	Não	Não	Não	Comércio e Serviços	1	17,15	355
D	IPO	IPO	Não	Sim	Não	Comércio e Serviços	0	12	95
D	IPO - PUN	IPO - Polo Universitário	Não	Não	Não	Comércio e Serviços	1	18,9	845
D	PUN	Polo Universitário	Sim	Sim	Sim	Comércio e Serviços	0	100	80
D	PUN - SAL	Pólo Universitário - Salgueiros	Sim	Não	Sim	Mista	0	100	735
D	SAL	Salgueiros	Sim	Sim	Sim	Mista	0	100	80
D	SAL - CMB	Salgueiros - Combatentes	Sim	Não	Sim	Mista	0	100	445
D	CMB	Combatentes	Sim	Sim	Sim	Mista	0	100	80
D	CMB - MRQ	Combatentes - Marquês	Sim	Não	Sim	Mista	0	100	710
D	MRQ	Marquês	Sim	Sim	Sim	Mista	0	100	80
D	MRQ - FGM	Marquês - Faria Guimarães	Sim	Não	Sim	Mista	0	100	575
D	FGM	Faria Guimarães	Sim	Sim	Sim	Mista	0	100	80
D	FGM - TRD_INF	Faria Guimarães - Trindade Inferior	Sim	Não	Sim	Mista	0	100	565
D	TRD_INF	Trindade Inferior	Sim	Sim	Sim	Mista	0	100	80
D	TRD_INF - ALD	Trindade Inferior - Aliados	Sim	Não	Sim	Comércio e Serviços	0	100	450
D	ALD	Aliados	Sim	Sim	Sim	Comércio e Serviços	0	100	80
D	ALD - SBT	Aliados - São Bento	Sim	Não	Sim	Mista	0	100	415
D	SBT	São Bento	Sim	Sim	Sim	Mista	0	100	80
D	SBT - JRD	São Bento - Jardim do Morro	Não	Não	Não	Comércio e Serviços	1	6,8	820
D	JRD	Jardim do Morro	Não	Sim	Não	Mista	0	12	95
D	JRD - GTR	Jardim do Morro - General Torres	Não	Não	Não	Mista	3	28,74	420
D	GTR	General Torres	Não	Sim	Não	Mista	0	12	95
D	GTR - CMG	General Torres - Câmara de Gaia	Não	Não	Não	Mista	2	25,06	490
D	CMG	Câmara de Gaia	Não	Sim	Não	Mista	0	12	95
D	CMG - JDS	Câmara Gaia - João de Deus	Não	Não	Não	Mista	2	26,13	410
D	JDS	João de Deus	Não	Sim	Não	Mista	0	12	95
D	JDS - DJ2	João de Deus - D. João II	Não	Não	Não	Mista	4	27,71	710
D	DJ2	D. João II	Não	Sim	Não	Mista	0	12	95
D	DJ2 - SOV	D. João II - Santo Ovídio	Não	Não	Não	Mista	1	38,88	430
D	SOV	Santo Ovídio	Sim	Sim	Sim	Mista	0	100	80

Tabela 17 - Segmentos e suas características geométricas, 2020 (Autor, 2022)

Linha		Local	Vedação	Estação	Túnel	Ocupa. Solo	Nº Cruzam.	Larg. (m)	Comp. (m)
E	AER	Aeroporto	Sim	Sim	Não	Mista	0	100	95
E	AER - BTC	Aeroporto - Botica	Não	Não	Não	Mista	1	49,87	640
E	BTC	Botica	Não	Sim	Não	Mista	0	12	95
E	BTC - VRD	Botica - Verdes	Não	Não	Não	Mista	1	49,73	675
F	DRG - CTM	Estádio do Dragão - Contumil	Sim	Não	Não	Mista	0	100	640
F	CTM	Contumil	Não	Sim	Não	Mista	0	12	95
F	CTM - NSN	Contumil - Nasoni	Não	Não	Não	Residencial	3	19,12	650
F	NSN	Nasoni	Não	Sim	Não	Campo	0	12	95
F	NSN - VIT	Nasoni - Nau Vitória	Não	Não	Não	Campo	0	22,35	490
F	VIT	Nau Vitória	Sim	Sim	Sim	Campo	0	100	80
F	VIT - LEV	Nau Vitória - Levada	Sim	Não	Sim	Comércio e Serviços	0	100	1030
F	LEV	Levada	Não	Sim	Não	Mista	0	12	95
F	LEV - RIO	Levada - Rio Tinto	Não	Não	Não	Mista	2	11,32	450
F	RIO	Rio Tinto	Não	Sim	Não	Residencial	0	12	95
F	RIO - CPI	Rio Tinto - Campainha	Não	Não	Não	Mista	3	8,9	855
F	CPI	Campainha	Não	Sim	Não	Mista	0	12	95
F	CPI - BAG	Campainha - Baguim	Não	Não	Não	Campo	1	6,81	750
F	BAG	Baguim	Não	Sim	Não	Campo	0	12	95
F	BAG - CAR	Baguim - Carreira	Não	Não	Não	Campo	2	28,56	785
F	CAR	Carreira	Não	Sim	Não	Campo	0	12	95
F	CAR - VND	Carreira - Venda Nova	Não	Não	Não	Mista	3	26,84	585
F	VND	Venda Nova	Não	Sim	Não	Mista	0	12	95
F	VND - FZR	Venda Nova - Fânzeres	Não	Não	Não	Mista	3	28,21	440
F	FZR	Fânzeres	Não	Sim	Não	Comércio e Serviços	0	12	95

Tabela 18 - Segmentos e suas características geométricas, 2020 (Autor, 2022)

Linha		Local	Vedação	Estação	Túnel	Ocupa. Solo	Nº Cruzam.	Larg. (m)	Comp. (m)
A,B,C,E,F	SHR	Senhora da Hora	Não	Sim	Não	Mista	0	12	95
A,B,C,E,F	SHR - 7BC	Senhora da Hora - Sete Bicas	Não	Não	Não	Mista	0	23,21	675
A,B,C,E,F	7BC	Sete Bicas	Não	Sim	Não	Mista	0	12	95
A,B,C,E,F	7BC - VSO	Sete Bicas - Viso	Sim	Não	Não	Mista	0	100	745
A,B,C,E,F	VSO	Viso	Sim	Sim	Não	Indústria	0	100	95
A,B,C,E,F	VSO - RMA	Viso - Ramalde	Sim	Não	Não	Comércio e Serviços	0	19,69	620
A,B,C,E,F	RMA	Ramalde	Sim	Sim	Não	Indústria	0	100	95
A,B,C,E,F	RMA - FRC	Ramalde - Francos	Sim	Não	Não	Residencial	0	13,74	965
A,B,C,E,F	FRC	Francos	Sim	Sim	Não	Mista	0	100	95
A,B,C,E,F	FRC - CDM	Francos - Casa da Música	Sim	Não	Não	Mista	0	100	855
A,B,C,E,F	CDM	Casa da Música	Sim	Sim	Sim	Mista	0	100	80
A,B,C,E,F	CDM - MIC	Casa da Música - Carolina Michaelis	Sim	Não	Não	Mista	0	100	605
A,B,C,E,F	MIC	Carolina Michaelis	Sim	Sim	Não	Mista	0	100	95
A,B,C,E,F	MIC - LPA	Carolina Michaelis - Lapa	Sim	Não	Não	Mista	0	100	490
A,B,C,E,F	LPA	Lapa	Sim	Sim	Não	Mista	0	100	95
A,B,C,E,F	LPA - TRD_SUP	Lapa - Trindade Superior	Sim	Não	Sim	Mista	0	100	860
A,B,C,E,F	TRD_SUP	Trindade Superior	Sim	Sim	Sim	Mista	0	100	80
A,B,C,E,F	TRD_SUP - BLH	Trindade Superior - Bolhão	Sim	Não	Sim	Mista	0	100	485
A,B,C,F	BLH	Bolhão	Sim	Sim	Sim	Mista	0	100	80
A,B,C,F	BLH - 24A	Bolhão - Campo 24 Agosto	Sim	Não	Sim	Mista	0	100	630
A,B,C,F	24A	Campo 24 de Agosto	Sim	Sim	Sim	Mista	0	100	80
A,B,C,F	24A - HRS	Campo 24 Agosto - Heroísmo	Sim	Não	Sim	Mista	0	100	525
A,B,C,F	HRS	Heroísmo	Sim	Sim	Sim	Mista	0	100	80
A,B,C,F	HRS - CPN	Heroísmo - Campanhã	Sim	Não	Sim	Mista	0	100	815
A,B,C,F	CPN	Campanhã	Sim	Sim	Sim	Mista	0	100	80
A,B,F	CPN - DRG	Campanhã - Estádio do Dragão	Sim	Não	Não	Residencial	0	100	1150
A,B,F	DRG	Estádio do Dragão	Sim	Sim	Sim	Mista	0	100	80

3.3 - Segmentação da Rede e Construção da Base de Dados

Um assunto de abordagem relevante, para uma maior qualidade científica dos resultados gerados neste trabalho, é o seccionamento das áreas a serem estudadas. Visto que a adoção de uma segmentação, mesmo que esta não seja uniforme em termos de extensão, tem impacto no estudo dos acidentes, ao possibilitar desmembrar a rede e realizar uma análise de forma não homogênea.

O mais interessante seria fazer uma segmentação em frações de mesma natureza ou com dimensões fixas. Contudo, muitas vezes não é algo viável de se obter, uma vez que, tudo consistirá nos dados à disposição.

Para conceber a repartição de uma rede, deve ter em atenção a finalidade almejada com a modelação. Por exemplo, este estudo possui uma segmentação, quase que natural, quando é observado as estações. Sendo possível dividir, como mencionado anteriormente, em estações e troços entre estações. Isto faz com que, para além da heterogeneidade dos locais sejam pautados, também vem a estabelecer a extensão de cada localidade como algo a ser estudado.

Depois do processo de dividir a rede, deu-se a preparação do banco de dados a ser utilizado para a elaboração dos modelos. Sendo, a base de dados, organizada através da caracterização das partes segmentadas de acordo com as suas diversas propriedades, mencionadas seguidamente:

- Compreensão de quais linhas passavam por cada local;
- Os acidentes, em sua totalidade e separados por tipologia, que ocorrem naquele local;
- Classificar as localidades quanto a vedação e túnel;
- Atribuir a cada local, uma frequência média diária anual e excluir os anos em que não possui informações sobre a frequência;
- Determinar a extensão de cada fração (estação e entre estações) ao mesmo tempo que indicava o número de cruzamentos de cada trecho com a rede viária;
- Identificação do tipo de ocupação do solo e a largura média de cada local.

Após a finalização da caracterização dos segmentos, as informações foram ordenadas de acordo com as linhas que passam pelo local. Sendo que a partir a estação Senhora da Hora até Estádio do Dragão foi atribuído a nomenclatura de Tronco Comum, por serem estações que compartilham, em sua maioria, praticamente todas as linhas.

3.4 - Seleção de Variáveis Independentes

A determinação das variáveis independentes, também conhecidas como explicativas, foi elaborada por meio da observação das informações e da compreensão dos casos, levando em consideração o objetivo do estudo em questão.

A unidade de observação adotada neste trabalho são os troços da rede ao longo dos anos na série histórica em questão (2012 a 2020). A variável dependente associada ao observador é o número de acidentes. Desta forma, fica viável determinar a frequência da ocorrência de acidentes.

Neste trabalho não foram explorados pormenores temporais, como dia e hora, nem coordenadas detalhadas. A procura da população pelos serviços ofertados pelo metro não vieram a ser abordados, em detrimento de que através dos dados tem-se o conhecimento de quantas pessoas usufruíram daquele local para entrar nos veículos do metro, mas não se sabe

o local ao qual as pessoas descem dos veículos. Em suma, a informação a cerca da procura não dita se o veículo estará circulando naquele local em sua máxima capacidade ou não.

As variáveis independentes empregadas nesta análise por ter alguma possibilidade de influenciar com alguma significância são:

- Vedação - o local em questão é ou não vedado, em que o local vedado não possibilita que o cliente do metro atravessasse de uma borda/cais da linha para a outra sem ter de passar por um lugar dedicado a este movimento;
- Estação - se o segmento em questão é tido como uma estação da rede metroviária do Porto ou um troço entre estações;
- Túnel - se o local é ou não uma galeria subterrânea;
- Ocupação do solo - as regiões em que os segmentos do metro estão inseridos podem ser classificadas em: 1 - indústria; 2 - Comércio e serviços; 3 - Residencial; 4 - Campo; 5 - Mista (engloba a comércio e serviços com residencial);
- Número de cruzamentos - é o número de vezes em que as intersecções entre a linha do metro e a rede viária em um segmento específico;
- Largura - é a largura média que o segmento possui, sendo que leva em consideração as larguras das faixas de rodagens imediatamente ao lado da linha do metro;
- Comprimento - é a extensão que cada segmento da linha do metro possui;
- Frequência - é o valor médio diário anual da passagem de veículos do metro por cada linha.

As variáveis categóricas do modelo são apresentadas por meio de variáveis dummy, que possuem a função de agir como um auxiliar para gerar os resultados, ao representar os valores como 0 ou 1. Assim sendo, quando uma categórica possui duas possíveis escolhas, por exemplo Túnel (sim ou não) ou Vedação (vedado ou não vedado), será fornecido o valor de 1 quando estiver de acordo com a opção da variável (sim para Túnel e vedado) e 0 para o outro.

No caso da variável categórica Ocupação do Solo, a mesma teve de ser desmembrada consoante o seu número de categorias (1 a 5). Portanto, criou-se as variáveis dummies: OSol1, OSol2, OSol3, OSol4 e OSol5. Sendo que os valores seguem os mencionados anteriormente (1 para “sim” e 0 para “não”).

3.5 - Modelação

Seguidamente a organização dos dados, deu-se início a modelação. Neste momento teve-se a aplicação do modelo de Poisson e da análise cluster. Foram realizados um modelo voltado

para o número de colisões entre veículos do metro com veículos de terceiros e acidentes com peões.

3.5.2 - ETAPAS DA MODELAÇÃO

O processo de modelação foi executado com recurso do software NLOGIT. As seguintes etapas foram realizadas em relação ao método de modelação aplicada neste trabalho:

1º período - organizar os dados e variáveis do banco de dados de modo a ser aplicado aos softwares mencionados anteriormente;

2º período - execução das análises clusters através do RStudio.

3º período - primeiro correu-se o modelo com todas as variáveis e, através de uma abordagem com o método Stepwise, foram retiradas aquelas que não estavam apresentando significância estatística, neste caso, ao menos 95%. Isto foi feito até que todas fossem significativas, em especial a variável categórica que foi transformada em dummies. Desta forma, obtendo os parâmetros das variáveis independentes e demais informações relevantes;

A relação existente entre a variável dependente e as independentes é o que sustenta a aplicação dos modelos aos segmentos estudados.

Para a validação do emprego do modelo de Poisson, foi utilizado o teste qui-quadrado, também conhecido como distribuição χ^2 , tendo como hipótese nula que a variância do número de acidentes seja equivalente à média.

3.5.2 - AVALIAÇÃO DO MODELO

No capítulo 2, teve-se a abordagem da avaliação do desempenho do modelo como uma maneira de confirmação do mesmo. Sendo então, uma etapa relevante para o avanço dos modelos. Uma vez que, ao constatar que estes, além de terem representatividade, possuem utilidade e são adequados para o objetivo proposto.

Para este estudo foi considerado o Pseudo- R^2 de Mc Fadden como critério de desempenho do modelo, em que objetiva averiguar a significância do modelo e seus valores vão de 0 a 1. Quanto mais próximo a 1 estiver o seu resultado, melhores são os valores das estimativas. A sua fórmula consiste em:

$$\text{Pseudo} - R^2 = 1 - \frac{LLF}{LLF_0} \quad (4)$$

Em que LLF consiste no valor maximizado da função Logarítmica de verosimilhança e LLFo na função Logarítmica de verosimilhança restrita.

Capítulo 4 : Resultados e Análises

No presente capítulo serão abordados os resultados e as análises dos modelos de acidentes elaborados de acordo com a variável resposta, número de acidentes. Para desenvolver a modelação foi necessário usar, primeiramente, como recurso de cálculo o programa NLOGIT, tendo o banco de dados utilizado como o caracterizado no capítulo 3. Sendo desconsiderado todas as variáveis com parâmetros estimados com valores abaixo de 95% e, assim, determinando o nível de confiança.

Ao transcorrer do presente capítulo, haverá a descrição dos modelos desenvolvidos, assim como seus resultados. Contudo, antes de prosseguir, é importante mencionar que uma análise com base nas variáveis geradas pelo NLOGIT não é adequada para os acidentes totais. Visto que a tipologia dos acidentes abordados por eles são de caráter distintos um do outro, fazendo com que a correlação separada entre as variáveis independentes e dependente não produza interpretações, mesmo que pouco, concisas.

Após realizar a análise cluster (adotando todas as variáveis), com apoio no RStudio, foi possível notar que curva da silhueta (Figura 14), curva a qual auxilia na identificação do valor ótimo de cluster, detém 6 como valor de maior silhueta. Contudo, adotou-se 5, como sendo o número de cluster, por ser mais simples e porque a partir deste valor a curva começa a oscilar de forma quase constante em seus valores. Além disto, depois de correr todos os bancos de dados, viu-se que todos apresentavam a mesma silhueta, logo, a clusterização dos diferentes dados teriam o mesmo rigor.

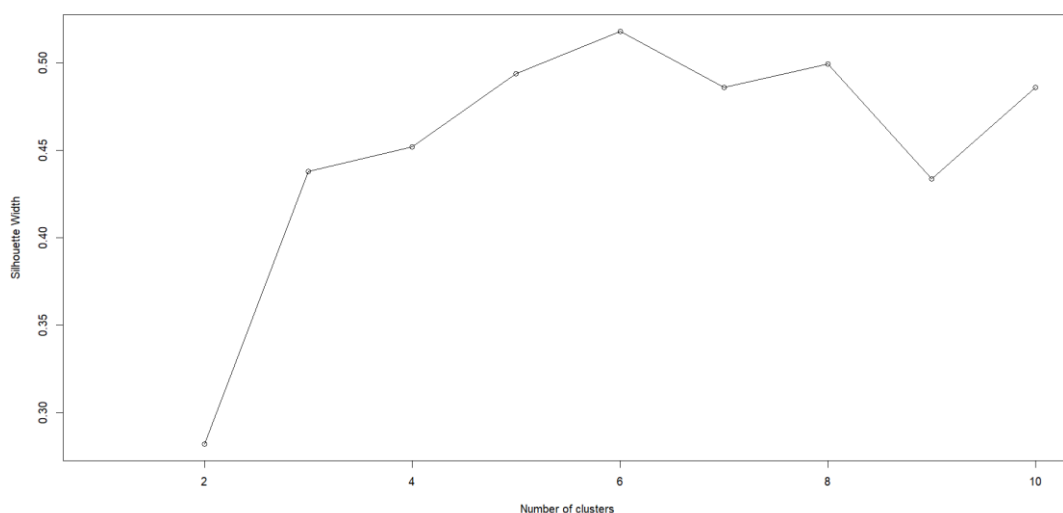


Figura 14 - Curva da silhueta (RStudio, 2022)

4.1 - Análise Cluster dos Acidentes Totais

Pode se observar na figura 15, a seguir, todas as amostras do estudo num espaço gerado pelo software RStudio (com todos os parâmetros):

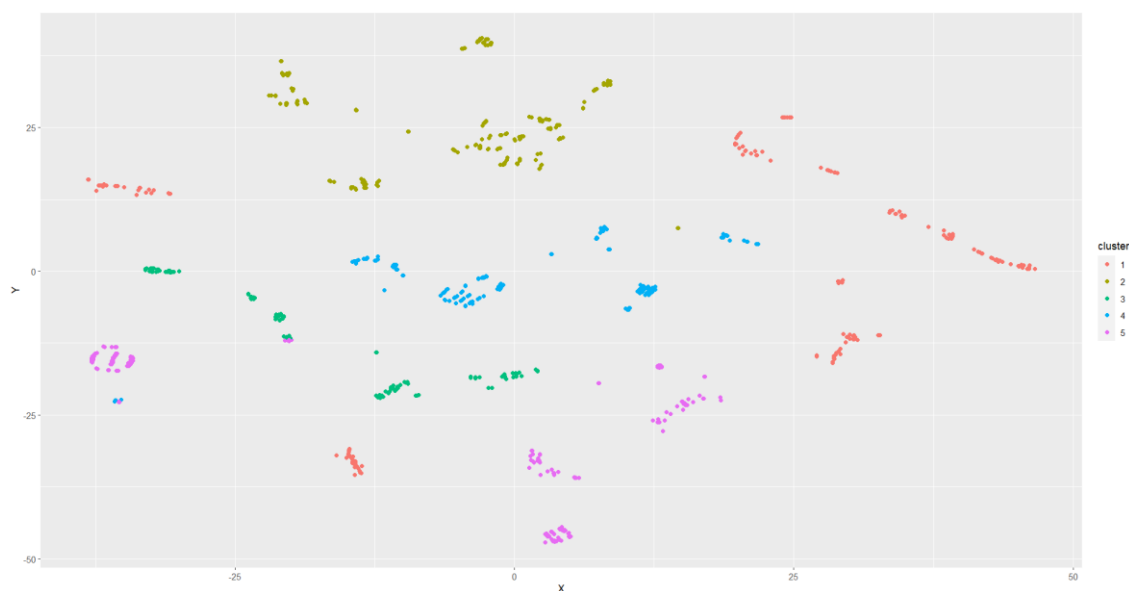


Figura 15 - Amostras dos 5 clusters no espaço amostral nos acidentes totais (RStudio, 2022).

4.1.1 - INTERPRETAÇÃO DOS COEFICIENTES DO MODELO

Tabela 19 - Resultados dos clusters de acidentes totais, excepto o parâmetro Ocupação do Solo (Autor, 2022)

TOTAL												
Cluster	Nº de Amostra	NAcid	Ved		Est		Tunel		NCruz	Larg	Comp	Freq
			Sim	Não	Sim	Não	Sim	Não				
1	369	0,09	0	369	369	0	0	369	0,00	12,00	95,00	95,72
2	351	0,68	9	342	0	351	0	351	2,33	24,35	693,30	90,75
3	200	0,08	200	0	200	0	0	200	0,00	100,00	95,00	155,67
4	266	0,04	266	0	0	266	9	257	0,21	76,09	1095,00	150,13
5	281	0,01	281	0	173	108	270	11	0,00	100,00	280,80	190,84

Tabela 20 - Resultados dos clusters de acidentes totais, somente o parâmetro Ocupação do Solo (Autor, 2022)

TOTAL										
Cluster	Osol									
	Indústria	Comércio e	Residência	Campo	Mista					
1	18	0,05	45	0,12	63	0,17	63	0,17	180	0,49
2	18	0,05	36	0,10	45	0,13	72	0,21	180	0,51
3	18	0,09	13	0,07	36	0,18	99	0,50	34	0,17
4	9	0,03	18	0,07	36	0,14	158	0,59	45	0,17
5	9	0,03	27	0,10	0	0,00	9	0,03	236	0,84

Por meio das tabelas 19 e 20, é possível ver como os extremos nos resultados da análise cluster dos acidentes totais, ou seja, com a base de dados somando os acidentes dos dois anteriores (colisões do metro com veículos e atropelamento com peões), destacam-se os grupos 2 e 5. No cluster 2 há um valor elevado, quando comparado com os demais, para o número de acidentes. Nele os seus locais estão inseridos em regiões de ocupação, maioritariamente, mista

com as características de serem segmentos entre estações, não possuindo vedação e encontrando-se em superfície. Sua exposição ao metro é de menor frequência de passagem dos veículos do metro (quando comparada com as demais), mas com grandes comprimentos e elevado número de cruzamentos.

Em outras palavras, isto quer traduzir que os locais mais propensos, a terem qualquer um dos dois tipos de acidente abordados neste trabalho, são aqueles que estão sujeitos a grandes exposições devida a geometria dos segmentos (muito extensos e com grande número de cruzamentos), com uma tipologia da região que apresenta ter um fluxo de pessoas e carros mais intenso, o que demonstra que a frequência do metro não tem tanto impacto quanto a intensidade do fluxo dos outros envolvidos (veículos terceiros e peões). Além disto, por estarem em superfície, juntamente com a presença de muitas interseções, ficam mais sujeitos a acidentes quando tem trânsito viário mais intenso. Da mesma forma pode-se apontar para a ausência de obstáculos para passagem dos peões fora de locais destinados a isto, ou seja, a probabilidade de terem acidentes com os peões em locais não vedados será mediante a quantidade de pessoas circulando aos arredores da linha.

Já no cluster 5, por representar locais em que, predominantemente, são estações subterrâneas e que não permitem a passagem das pessoas de um cais para o outro, faz com que impossibilite a existência de acidentes de colisão com veículos e não faz ser atrativo atravessar, de uma plataforma para outra, fora dos devidos pontos. Além disto, o tipo de atividade na região, a presença de muitas habitações e seu fluxo de pessoas (dada pela alta frequência nestes lugares), não impactam de forma negativa para a segurança na operação do metro.

4.2 - Modelo de Previsão de Frequência de Acidentes de Colisões com Veículos Terceiros

4.2.1 - RESULTADOS DO MODELO

Tendo o banco de dados construído na secção 3.4 como premissa, foi elaborado o modelo para os acidentes de colisões com veículos terceiros, traduzindo a aplicação de um modelo linear generalizado.

Normalmente, o método para modelar um estudo de análise de acidentes começa ao ter em conta para a variável resposta as regressões de Poisson e Binomial Negativa. Somente após a realização do qui-quadrado (ou teste χ^2), adotando a variância da variável resposta sendo de mesmo valor à média como hipótese nula, que é comprovado através de um resultado do teste de sobredispersão ($g(\mu_i) = 0,924$), sendo menor que o valor de 3,84. E assim, não rejeita a

hipótese de a média ter o mesmo valor da variância e possuir a regressão de Poisson como a que melhor se ajusta aos dados.

Com isto, foi realizado o modelo para a distribuição de Poisson e, assim como descrito na secção 3.5, foi realizada a calibração através do método Stepwise, subtraindo do modelo as variáveis independentes não significativas estatisticamente. Então, depois de executar o modelo, foi observado que para os acidentes de colisões com veículos terceiros as variáveis explicativas Túnel, Largura e Frequência de passagens não apresentavam significância estatística, uma vez que não alcançavam um nível de confiança superior a 95%. Assim como o descrito na secção 2.1, para estimar os parâmetros de regressão foi empregue o método da máxima verossimilhança. Na tabela 21 a seguir, é apresentado os coeficientes estimados e algumas medidas para avaliação de desempenho consideradas para o modelo de acidentes.

Tabela 21 - Resultados estimação dos parâmetros, modelo Poisson de acidentes de colisão com veículos (Autor, 2022)

Variável dependente: Acidentes de Colisões com Veic.			
Variáveis Independentes	Parâmetro estimado	Desvio padrão	Prob. $z > Z^*$
VED	-2,46751	0,50546	0
EST	-2,57998	0,77145	0,0008
OSOL1	-1,41855	0,37364	0,0001
OSOL2	-2,69986	0,40516	0
OSOL3	-3,68482	0,42105	0
OSOL4	-3,59402	0,4966	0
OSOL5	-2,75023	0,32314	0
NCRUZ	0,48682	0,04173	0
COMP	0,00093	0,00037	0,0128
Medidas de avaliação do desempenho			
Função Logarítmica de verossimilhança			-305,62933
Função Logarítmica de verossimilhança restrita			-651,05774
Mc Fadden pseudo R^2			0,5305649

Depois da execução do modelo no NLOGIT, foi realizada a clusterização dos dados no software RStudio e, diferente do NLOGIT, com todos as variáveis independentes. Desta forma, se obteve 5 grupos, como é possível observar, seguidamente, na figura 16:

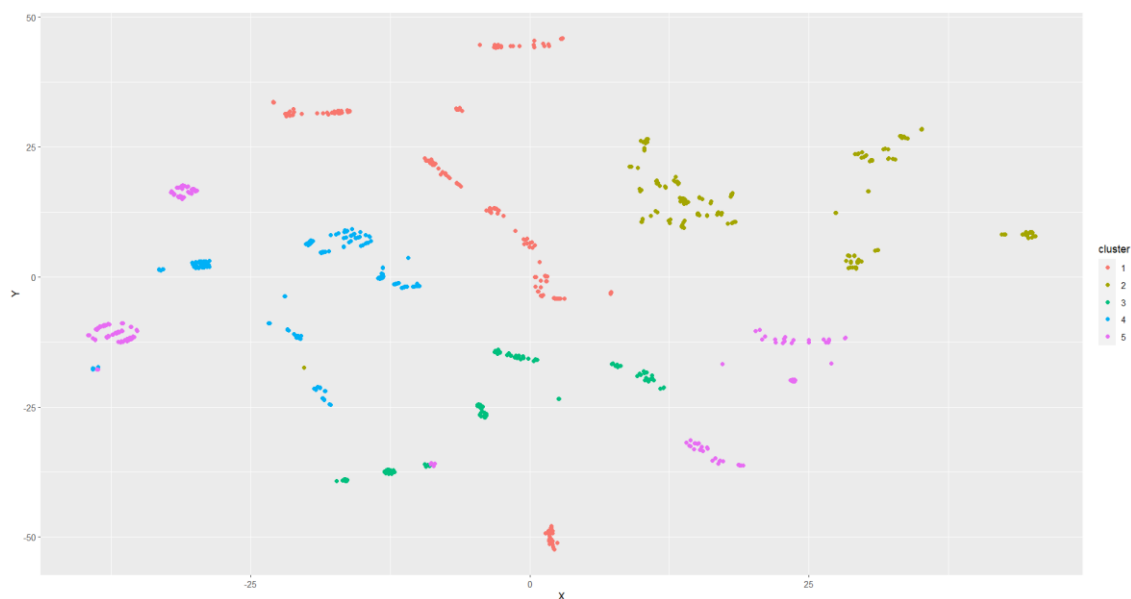


Figura 16 - Amostras dos 5 clusters no espaço amostral dos acidentes de colisão (RStudio, 2022).

4.2.2 - INTERPRETAÇÃO DOS COEFICIENTES DO MODELO

Tabela 22 - Resultados dos clusters de acidentes de colisão com veículos, excepto o parâmetro Ocupação do Solo (Autor, 2022)

Colisões												
Cluster	Nº de Amostra	NACid	Ved		Est		Tunel		NCruz	Larg	Comp	Freq
			Sim	Não	Sim	Não	Sim	Não				
1	369	0,00	0	369	369	0	0	369	0,00	12,00	95,00	95,72
2	351	0,52	9	342	0	351	0	351	2,33	24,35	693,30	90,75
3	200	0,01	200	0	200	0	0	200	0,00	100,00	95,00	155,67
4	266	0,01	266	0	0	266	9	257	0,21	76,09	1095,00	150,13
5	281	0,00	281	0	173	108	270	11	0,00	100,00	280,80	190,84

Tabela 23 - Resultados dos clusters de acidentes de colisão com veículos, somente o parâmetro Ocupação do Solo (Autor, 2022)

Colisões										
Cluster	Osol									
	Indústria		Comércio e		Residência		Campo		Mista	
1	18	0,05	45	0,12	63	0,17	63	0,17	180	0,49
2	18	0,05	36	0,10	45	0,13	72	0,21	180	0,51
3	18	0,09	13	0,07	36	0,18	99	0,50	34	0,17
4	9	0,03	18	0,07	36	0,14	158	0,59	45	0,17
5	9	0,03	27	0,10	0	0,00	9	0,03	236	0,84

A partir das tabelas acima é possível notar que entre os resultados da clusterização envolvendo os acidentes de colisão entre os veículos do metro e os veículos terceiros, pode-se destacar o grupo 2, como o que possui a maior média para o número de acidentes. Enquanto os demais grupos possuem valores médios próximos ou iguais a 0,00 para o número de acidentes.

O cluster 2 é caracterizado por locais entre estações à superfície com elevado número de cruzamentos, em lugares que, maioritariamente, não possuem obstáculos ao atravessamento dos peões de um lado da linha para o outro. Encontra-se em uma região predominantemente mista, ou seja, as localizações são de prédios comerciais, de serviço e residências. Seus troços

são muito extensos, de menor frequência de passagem de veículos do metro (quando comparada com as demais) e com baixa largura.

Com isto, é de notar que um ambiente com várias atividades e habitações, com grande número de cruzamentos é o que mais propicia a ocorrência de acidentes de colisões. Além de que para este caso, a exposição ao risco está mais atrelada a extensão dos segmentos.

Contudo, também deve destacar que não é necessariamente devido a um alto valor do comprimento e frequência que haverá muitas colisões. Por exemplo, é de se observar que o cluster 4, mesmo estando entre estações e possuindo frequência e extensão de seus troços, possui menor valor de acidentes. Isto, pode ser justificável pela presença de poucos cruzamentos da linha com a rede viária e estar em um ambiente de ocupação caracterizada por ser sobretudo de campos.

Já o grupo 1, assim como o cluster 2, está numa região de ocupação mista com o metro à superfície, mas encontra-se em uma situação em que não possui intersecções que possibilitem aos carros da rede viária atravessar na linha do metro. Além disto, os seus segmentos tem menor frequência de veículos do metro (quando comparada com as demais) e baixa extensão. Obviamente, é de notar que por não possuir intersecções, não haverá a possibilidade de ter-se colisões do metro com veículos terceiros.

É plausível que para alguns grupos, nomeadamente o 1,3 e 5, não detenham ocorrência de colisões, ou tenham pouco. Visto que não há neles intersecções entre as linhas metroviárias e a rede viária, o que quase impossibilita a origem de uma casualidade. Para que se dê, nesta circunstância, tal tipologia de acidente seria necessário que algum condutor, fora de suas competências mentais, adentrasse na linha do metro por outro meio.

Agora, com o objetivo de analisar a importância das variáveis e tendo em mente que, o que foi mencionado acima é referente ao observado através do cluster, é de interesse interpretar os valores estimados para os coeficientes, tendo os resultados do NLOGIT como base. Vale ressaltar que o NLOGIT interpreta a relação de cada variável explicativa com a variável resposta de forma separada, gerando assim, a estimação dos parâmetros. Tendo isto em mente, então, é possível constatar que a vedação impacta de modo considerável para a redução de acidentes, tal fenômeno pode acontecer, uma vez que os lugares vedados tem mais dispositivos de sinalização nos pontos específicos para a passagem dos carros.

Já o comprimento e o número de cruzamentos, constata-se que a exposição por segmentos vai implicar nas chances de se ter um acidente, ou seja, quanto mais exposto o local se encontra, maiores são as chances de acontecer um acidente. Enquanto se o local é uma estação ou um segmento entre estações tem uma relevância na exposição, sendo que os acidentes de colisões não podem ocorrer em estações, em outras palavras, se for estação não haverá

possibilidade de ter acidentes com veículos terceiros, logo quanto mais amostras estiverem em estações, menor será o número de acidentes.

Além disto, é de destacar que apesar de todos os tipos de ocupação do solo terem valores negativos, isto não significa que todos contribuem para não acontecerem acidentes. Na realidade as variáveis dummies referentes a ocupação do solo revelam quais são as regiões mais propensas a terem ocorrências. Então, é possível notar que elas não possuem valores iguais entre si, sendo possível estabelecer uma ordem sobre elas. Logo, a ordem para este caso, de locais que geram menos acidentes para os que causam mais acidentes, é: Osol3 (Residencial), Osol4 (Campo), Osol5 (Mista), Osol2 (Comércio e Serviços) e Osol1 (Indústria).

4.3 - Modelo de Previsão de Frequência de Acidentes com Peões

4.3.1 - RESULTADOS DO MODELO

Assim como no anterior, neste modelo também foi feita o paralelo entre as distribuições Binominal Negativa e Poisson. Contudo, seguidamente ao resultado do teste de sobredispersão ($g(\mu) = 0,498$), pode-se ver que a distribuição de Poisson é a mais adequada, uma vez que possui valor menor que 3,84.

Assim como no modelo das colisões, foi realizado o modelo para a distribuição de Poisson e, assim como descrito na seção 3.5, foi realizado o ajuste através do método Stepwise, subtraindo do modelo as variáveis independentes não significativas estatisticamente. Sendo possível observar que, diferente dos demais modelos com os bancos de dados anteriores, somente as variáveis explicativas Vedação e Comprimento não apresentavam significância estatística. Na tabela 24 a seguir, são exibidos os coeficientes estimados e algumas medidas para avaliação de desempenho consideradas para o modelo de acidentes.

Tabela 24 - Resultados estimação dos parâmetros, modelo Poisson de acidentes envolvendo peões (Autor, 2022)

Variável dependente: Acidentes com Peões			
Variáveis Independentes	Parâmetro estimado	Desvio padrão	Prob. $z > Z^*$
TUNEL	-1,44229	0,56952	0,0113
EST	0,64291	0,25992	0,0134
OSOL1	-3,25312	0,51926	0
OSOL2	-3,54344	0,39855	0
OSOL3	-3,94669	0,38731	0
OSOL4	-3,72265	0,35075	0
OSOL5	-3,31712	0,31496	0
NCRUZ	0,44982	0,06185	0
LARG	-0,0127	0,00365	0,0005
FREQ	0,0054	0,00085	0
Medidas de avaliação do desempenho			
Função Logarítmica de verosimilhança			-348,41357
Função Logarítmica de verosimilhança restrita			-414,29893
Mc Fadden pseudo R ²			0,1590286

Após a execução do modelo no NLOGIT, foi feita a clusterização dos dados no software RStudio e, diferente do NLOGIT, com todas as variáveis independentes. Desta forma, se obteve 5 grupos, como é possível observar, seguidamente, na figura 17:

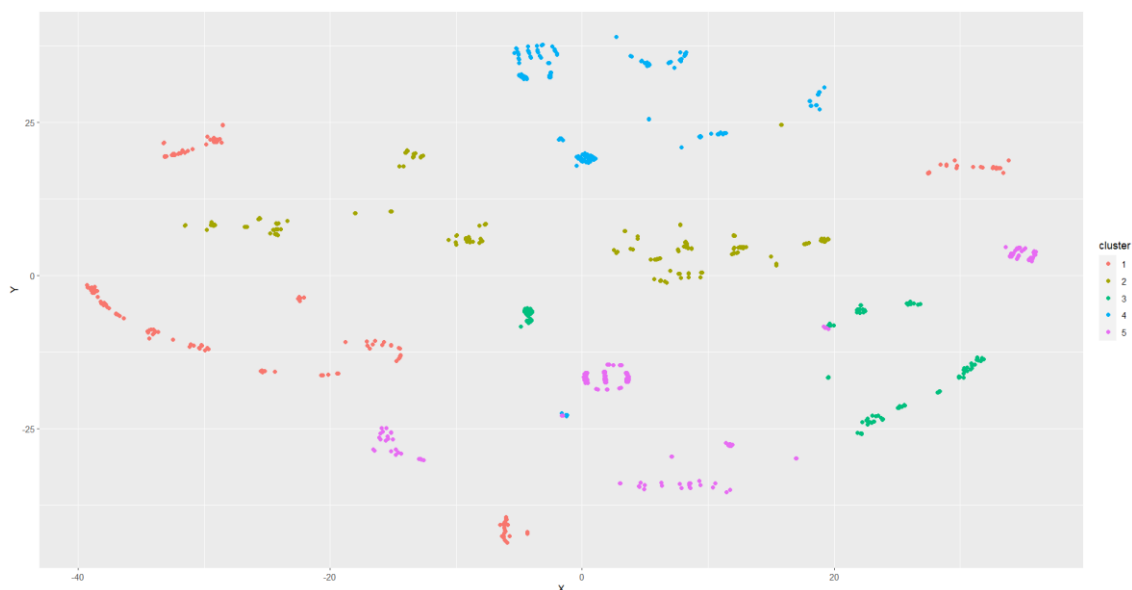


Figura 17 - Amostras dos 5 clusters no espaço amostral nos acidentes com peões (RStudio, 2022).

4.3.2 - INTERPRETAÇÃO DOS COEFICIENTES DO MODELO

Tabela 25 - Resultados dos clusters de acidentes com peões, excepto o parâmetro Ocupação do Solo (Autor, 2022)

Peões												
Cluster	Nº de Amostra	NAcid	Ved		Est		Tunel		NCruz	Larg	Comp	Freq
			Sim	Não	Sim	Não	Sim	Não				
1	369	0,09	0	369	369	0	0	369	0,00	12,00	95,00	95,72
2	351	0,16	9	342	0	351	0	351	2,33	24,35	693,30	90,75
3	200	0,07	200	0	200	0	0	200	0,00	100,00	95,00	155,67
4	266	0,03	266	0	0	266	9	257	0,21	76,09	1095,00	150,13
5	281	0,01	281	0	173	108	270	11	0,00	100,00	280,80	190,84

Tabela 26 - Resultados dos clusters de acidentes com peões, somente o parâmetro Ocupação do Solo (Autor, 2022)

Peões										
Cluster	Osol									
	Indústria		Comércio e		Residência		Campo		Mista	
1	18	0,05	45	0,12	63	0,17	63	0,17	180	0,49
2	18	0,05	36	0,10	45	0,13	72	0,21	180	0,51
3	18	0,09	13	0,07	36	0,18	99	0,50	34	0,17
4	9	0,03	18	0,07	36	0,14	158	0,59	45	0,17
5	9	0,03	27	0,10	0	0,00	9	0,03	236	0,84

As tabelas acima foram geradas em decorrência da clusterização dos acidentes que envolvem os peões e o metro, é possível realçar que, assim como nas colisões, os locais que detêm os maiores valores de ocorrências são aqueles que integram o grupo 2. Vale ressaltar que mesmo possuindo a mesma enumeração, não implica que necessariamente sejam iguais. Contudo, é possível notar que todas as características referentes ao cluster 2, tanto do acidente com os peões quanto com as colisões com veículos, possuem mesmos valores. Indo mais além, os grupos de 1 a 5 para os acidentes de colisão possuem equivalência para com os clusters de 1 a 5 dos acidentes com peões, todos.

Através disto, é de se reparar que para locais entre estações com exposição gerada por segmentos extensos e com grande número de cruzamentos, podem ser atrativos para que os peões atravessem sobre a linha do metro em pontos indevidos e de forma desatenta. Enquanto nos locais referentes ao cluster 1 que, assim como no grupo 2, não são lugares que impossibilitem a passagem de peões fora dos pontos corretos e a superfície, além de deterem baixa média do comprimento dos segmentos. Isto indica que estes fatores são importantes, mas não são decisivos para a ocorrência de um acidente. O número de cruzamentos entre a rede metroviária e viária não aparenta ser tão relevante para esta análise cluster, já que os lugares que possuem com o segundo (cluster 1) e terceiro (cluster 3) maiores níveis de acidentes não possuem valor médio para esta variável.

Em contrapartida, o cluster 5 representa os lugares com menor proporção de acidente entre os grupos. Sendo caracterizado por serem locais que com maioria em estações e impossibilitam a passagem de peões fora de pontos específicos, ou seja, estações vedadas para peões e carros. A região ao seu entorno pode ser definida como, primordialmente, mista com valor nulo para o número de cruzamentos com a rede viária e valor médio elevado para passagem de veículos. Além disto, possui alto valor para a extensão dos segmentos e largura. O que indica que mesmo os lugares tenham uma passagem de veículos do metro de elevada frequência, sendo muito compridos e com muitas ocupações, isto não traduz um interesse muito grande para os peões fazerem atravessamentos não permitidos e/ou, então, faz com que eles sejam mais cautelosos, justamente por terem a sensação de maior exposição ao risco.

Além disto, os resultados gerados pelo NLOGIT revelam que os locais não situados a superfície apresentam menos acidentes, isto dá-se porque no subterrâneo a linha está vedada para a passagem dos passageiros e impossibilita o atravessamento na linha por peões. Tanto para a presença de estações quanto para a frequência do metro, representaram um aumento dos acidentes, em outras palavras, as estações são lugares que possibilitam a aglomeração de pessoas e, assim como a frequência de passagem de veículos, fazendo com que estejam mais expostas, ainda mais se a estação em si não for vedada. Para o número de cruzamentos, a sua existência pode atuar como um estímulo para os peões atravessarem fora dos pontos dedicados para tal, ou seja, quanto maior o número de interseções entre a rede viária e a linha do metro, maior o número de acidentes.

Assim como no caso anterior (acidentes de colisões), é possível notar que as variáveis dummies referentes a ocupação do solo não possuem valores iguais entre si, sendo possível estabelecer uma ordem sobre elas. Logo, a ordem para este caso, de locais que geram menos acidentes para os que causam mais acidentes, é: Osol3 (Residencial), Osol4 (Campo), Osol2 (Comércio e Serviços), Osol5 (Mista) e Osol1 (Indústria).

Capítulo 5: Conclusão

Os níveis de poluição estão a cada dia se agravando, de acordo com Escritório Nacional de Administração Oceânica e Atmosférica dos Estados Unidos (NOAA), em maio de 2022 a concentração de CO₂ na atmosfera registou nível 50% superior ao da era pré-industrial. Isto traduz que o grau de periculosidade para a saúde num futuro, não muito distante, está cada vez maior. Portanto, devemos buscar meios de contornar esta situação e uma saída, mais que viável para isto, é a implantação de meios de transportes urbanos limpos que possibilitem a redução do uso de veículos com combustíveis fósseis, como ampliação da rede metroviária. Contudo, uma procura cada vez maior sobre esta modalidade de transporte fará com que a sua frequência seja intensificada e sua rede ampliada, o que irá trazer à tona outra problemática, os seus níveis de acidentes. Tais ocorrências, mesmo que raras, repercutem no prestígio deste meio de transporte e, assim como, na adoção deste pela população.

As abordagens utilizadas para a realização dos relatórios após a ocorrência do acidente será o que irá possibilitar a criação de um banco de dados, o qual influenciará no estudo dos fatores que implicam numa casualidade.

Por tal motivo este trabalho teve como foco o estudo voltado para os MPAs. Uma vez que, são estes que possibilitam apontar quais são os fatores que apresentam risco e, desta forma, encontrar meios para reduzir a sua influência em situações semelhantes, ou seja, evitando ou atenuando um acidente. Após determinar as medidas que podem ser implementadas, as ações para suas aplicações serão feitas tendo base nas que geram maior segurança técnica aos locais.

Os modelos de previsão de acidentes são MLG que detém uma componente aleatória, a qual apropria-se de uma regressão de Poisson ou Binomial Negativa. Para este estudo em questão, a regressão de Poisson apresentou ser a mais conveniente para os tipos de acidentes analisados (colisões entre o metro e veículos terceiros, acidentes do metro com peões e a soma destes dois, os totais).

O objetivo do trabalho foi alcançado de forma satisfatória, visto que foi apontado os fatores que influenciam em cada tipo de acidente e o seu grau de relevância. Além disto, identificou-se as características geométricas referentes aos locais que são mais propícios a terem acidentes. Sendo, então, um trabalho de caráter adjutório na tomada de decisões técnicas nas possíveis estratégias de intervenção e gestão da segurança.

As interpretações geradas com base nos resultados dos modelos, com os dados de 2012 a 2020, revelam que os fatores de exposição geométrica (estação/troço entre estação, largura, comprimento e número de cruzamentos dos segmentos) e exposição de operação (frequência

de passagem de veículos) tem grande influência para o número de acidentes, como era de se esperar.

Além disto, através dos clusters gerados, é possível ver que a característica dos locais que detém maiores ocorrências de acidentes são:

- Ocupação do tipo mista, ou seja, locais onde se tem a presença de residências, assim como atividades de comércio e serviços;
- Lugares à superfície e troços entre estações sem vedação, em outras palavras, permitem a passagem de peões de um lado da linha para o outro em qualquer ponto desta. Além de serem locais com alto número de cruzamentos em sua extensão, com pequenas dimensões em sua largura e comprimento;
- A frequência de passagem dos veículos do metro, em termos de média diária anual, é alta. Apesar disto, não tem impacto nas colisões entre os veículos do metro com veículos terceiros e acidentes com os peões.

Os fatores, quando analisados de forma separada e correlacionados com o número de acidentes, apontam que as suas importâncias, quando atribuídos às características dos locais existentes, podem não exprimir o que é na realidade prática, como é o caso da frequência de passagem de veículos. Portanto, os resultados dos modelos gerados através do NLOGIT tem muita relevância, ainda mais quando associados aos grupos gerados pela clusterização.

Para resumir, o trabalho elaborado e voltado para a modelação das informações a respeito dos acidentes da empresa Via Porto, responsável pela operação do Metro do Porto, permitem o desenvolvimento de planos com o intuito de diminuir o número de acidentes, tendo a análise estatística como base. A finalidade foi colaborar para uma maior eficiência para a escolha das medidas que possam vir a serem implementadas para o aumento da segurança daqueles que são e/ou podem ser impactados pela operação do metro. Além da qualidade dos serviços que a Via Porto oferta aos seus usuários.

5.1 - LIMITAÇÕES

As informações existentes não possibilitavam um estudo mais apurado de assuntos que também são de interesse, como a forma que a procura dos serviços do metro podem impactar no número de acidentes e como os diferentes modelos de previsão de acidentes podem responder aos dados. Além disto, por possuir uma quantidade extremamente baixa de acidentes, como suicídios e descarrilamentos (acidentes, a princípio, expectáveis em redes metroviárias), teve-se de fazer ajustes no modelo para trabalhar apenas com os que são presentes e de forma que sua unidade de observação fosse válida.

5.2 - RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Recomenda-se o desenvolvimento de mais trabalhos de mesmo caráter, tendo os seus estudos voltados para área metroviária. Uma vez que os modelos aplicados a acidentes já são muito conceituados na área rodoviária, mas não é algo explorado para os metros. Com isto, poderiam consolidar e atualizar, com precisão, os modelos estatísticos que devem ser empregues para obterem análises cada vez mais próximas da realidade, ficando a sugestão da exploração dos outros modelos sugeridos na secção 2.3. Além de, consequentemente, possibilitar estabelecer modelos base para relatórios desta área com uma gama de informações mais amplas para analistas de acidentes.

Bibliografia

Baleiro, J. M. R. (2006). Estudo da rede de massas e circuitos de retorno de um veículo ferroviário: EUROTRAM.

Barnatt, N., & Jack, A. (2018). Safety analysis in a modern railway setting. *Safety science*, 110, 177-182.

Bianco, S., Melis, G., Eynard, E., Marietta, C., Tabasso, M., Mamo, C., & Costa, G. (2015). A97 New metro line in Turin: an analysis of the impacts on local mobility and road traffic accidents. *Journal of Transport & Health*, 2(2), S55-S56.

Danchuk, V., Bakulich, O., & Svatko, V. (2017). An improvement in ant algorithm method for optimizing a transport route with regard to traffic flow. *Procedia Engineering*, 187, 425-434.

de Naurois, C. J., Bourdin, C., Stratulat, A., Diaz, E., & Vercher, J. L. (2019). Detection and prediction of driver drowsiness using artificial neural network models. *Accident Analysis & Prevention*, 126, 95-104.

Direção Municipal de Urbanismo da Câmara do Porto. Ocupação do Solo PDM Porto. Disponível em: <https://www.cm-porto.pt/files/uploads/cms/cmp/45/files/95/40-pdmp-eed-ocup-solo.pdf> (acesso em 15 de Fevereiro de 2022).

European Commission. EU Road Safety Policy Framework 2021-2030: Next steps towards 'Vision Zero'. Disponível em: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/d7ee4b58-4bc5-11ea-8aa5-01aa75ed71a1> (acesso em 29 de Abril de 2022).

Evans, A. W. (2011). Fatal train accidents on Europe's railways: 1980-2009. *Accident Analysis & Prevention*, 43(1), 391-401.

Evans, A. W. (2021). Fatal train accidents on Europe's railways: an update to 2019. *Accident Analysis & Prevention*, 158, 106182.

Evans, A. W., & Addison, J. D. (2009). Interactions between rail and road safety in Great Britain. *Accident Analysis & Prevention*, 41(1), 48-56.

Feigin, V. L., Roth, G. A., Naghavi, M., Parmar, P., Krishnamurthi, R., Chugh, S., ... & Study, R. F. (2016). Global burden of stroke and risk factors in 188 countries, during 1990-2013: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2013. *The Lancet Neurology*, 15(9), 913-924.

Feitosa, A. B., Silva, P. R., & Silva, D. R. (2014). A influência de vieses cognitivos e motivacionais na tomada de decisão gerencial: Evidências empíricas em uma empresa de construção civil brasileira. *Revista de Negócios*, 19(3), 3-22.

Guerrieri, M. (2018). Tramways in urban areas: an overview on safety at road intersections. *Urban Rail Transit*, 4(4), 223-233.

Jagniatinskis, A., Fiks, B., & Mickaitis, M. (2017). Determination of insertion loss of acoustic barriers under specific conditions. *Procedia Engineering*, 187, 289-294.

Jarašūnienė, A., Sinkevičius, G., & Mikalauskaitė, A. (2017). Analysis of application management theories and methods for developing railway transport. *Procedia Engineering*, 187, 173-184.

Jing, W., Xu, X., & Pu, Y. (2020). Route redundancy-based approach to identify the critical stations in metro networks: A mean-excess probability measure. *Reliability Engineering & System Safety*, 204, 107204.

Klockner, K., & Toft, Y. (2018). Railway accidents and incidents: Complex socio-technical system accident modelling comes of age. *Safety science*, 110, 59-66.

Kudláč, Š., Štefancová, V., & Majerčák, J. (2017). Using the Saaty Method and the FMEA Method for Evaluation of Constraints in Logistics Chain. *Procedia Engineering*, 187, 749-755.

Kyriakidis, M., Hirsch, R., & Majumdar, A. (2012). Metro railway safety: An analysis of accident precursors. *Safety science*, 50(7), 1535-1548.

Larouzee, J., & Le Coze, J. C. (2020). Good and bad reasons: The Swiss cheese model and its critics. *Safety science*, 126, 104660.

Leitner, B. (2017). A general model for railway systems risk assessment with the use of railway accident scenarios analysis. *Procedia engineering*, 187, 150-159.

Li, M., Yan, F., Niu, R., & Xiang, N. (2021). Identification of causal scenarios and application of leading indicators in the interconnection mode of urban rail transit based on STPA. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 17, 100238.

Li, Q., Song, L., List, G. F., Deng, Y., Zhou, Z., & Liu, P. (2017). A new approach to understand metro operation safety by exploring metro operation hazard network (MOHN). *Safety science*, 93, 50-61.

Liang, C., Ghazel, M., Cazier, O., & El-Koursi, E. M. (2018). Analyzing risky behavior of motorists during the closure cycle of railway level crossings. *Safety science*, 110, 115-126.

Liu, X., Saat, M. R., Qin, X., & Barkan, C. P. (2013). Analysis of US freight-train derailment severity using zero-truncated negative binomial regression and quantile regression. *Accident Analysis & Prevention*, 59, 87-93.

Lobo, A., Ferreira, S., Iglesias, I., & Couto, A. (2020). Daily and Latent Lagged Effects of Rainfall on Pedestrian-Vehicle Collisions. *Weather, climate, and society*, 12(2), 279-291.

Lu, Y., Li, Q., & Xiao, W. (2013). Case-based reasoning for automated safety risk analysis on subway operation: Case representation and retrieval. *Safety science*, 57, 75-81.

Makarova, I., Pashkevich, A., Shubenkova, K., & Mukhametdinov, E. (2017). Ways to increase population mobility through the transition to sustainable transport. *Procedia Engineering*, 187, 756-762.

Metro do Porto. Anexo I: apresentação do sistema de metro ligeiro da área metropolitana do Porto. Disponível em: <https://www.utap.gov.pt/PPP%20Ferroviarias/Viaporto/Anexos%20ao%20Caderno%20de%20En%20cargos/Anexo%209%20-%20CE%20-%20Anexo%20I.pdf> (acesso em 4 de Fevereiro de 2022).

Naweed, A., Hockey, G. R. J., & Clarke, S. D. (2013). Designing simulator tools for rail research: The case study of a train driving microworld. *Applied ergonomics*, 44(3), 445-454.

Organização Mundial da Saúde (OMS). Projecto de estratégia mundial da OMS sobre a saúde, o meio ambiente e as alterações climáticas. Disponível em: <https://www.afro.who.int/sites/default/files/2018-10/AFR-RC68->

12%20Estrat%C3%A9gia%20Mundial%20da%20OMS%20sobre%20mudan%C3%A7as%20clim%C3%A1ticas_0.pdf (acesso em 06 de Junho de 2022).

Pyza, D., Jachimowski, R., Jacyna-Gólda, I., & Lewczuk, K. (2017). Performance of equipment and means of internal transport and efficiency of implementation of warehouse processes. *Procedia Engineering*, 187, 706-711.

Read, G. J., Lenné, M. G., & Moss, S. A. (2012). Associations between task, training and social environmental factors and error types involved in rail incidents and accidents. *Accident Analysis & Prevention*, 48, 416-422.

Read, G. J., Naweed, A., & Salmon, P. M. (2019). Complexity on the rails: A systems-based approach to understanding safety management in rail transport. *Reliability Engineering & System Safety*, 188, 352-365.

Restel, F., & Wolniewicz, L. (2017). Tramway reliability and safety influencing factors. *Procedia Engineering*, 187, 477-482.

Silla, A., & Kallberg, V. P. (2012). The development of railway safety in Finland. *Accident Analysis & Prevention*, 45, 737-744.

Smith, T. J., & McKenna, C. M. (2013). A comparison of logistic regression pseudo R² indices. *Multiple Linear Regression Viewpoints*, 39(2), 17-26.

Torok, A. (2017). Statistical Analysis of Transport Performance: Case Study for Hungary. *Procedia Engineering*, 187, 722-725.

Vaičiūtė, K., Skirmantienė, J., & Domanska, L. (2017). Assessment of transport specialists' competencies in transport/logistics companies. *Procedia Engineering*, 187, 628-634.

Verzosa, N., & Miles, R. (2016). Severity of road crashes involving pedestrians in Metro Manila, Philippines. *Accident Analysis & Prevention*, 94, 216-226.

Wang, J., & Fang, W. (2014). A structured method for the traffic dispatcher error behavior analysis in metro accident investigation. *Safety science*, 70, 339-347.

Wang, R., Guiochet, J., Motet, G., & Schön, W. (2018). Modelling confidence in railway safety case. *Safety science*, 110, 286-299.

Yeo, M. W., Oh, S. C., Kim, C. H., & Lee, D. C. (2006, October). A study on the prevention of accidents in subway station through the surveys on accidents in a subway station. In 2006 SICE-ICASE International Joint Conference (pp. 3912-3915). IEEE.

Yu, Q. Z., Ding, L. Y., Zhou, C., & Luo, H. B. (2014). Analysis of factors influencing safety management for metro construction in China. *Accident Analysis & Prevention*, 68, 131-138.

Zhang, J., & Wang, M. (2019). Transportation functionality vulnerability of urban rail transit networks based on movingblock: The case of Nanjing metro. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 535, 122367.

Zhou, J. L., & Lei, Y. (2018). Paths between latent and active errors: Analysis of 407 railway accidents/incidents' causes in China. *Safety science*, 110, 47-58.

Zhou, Y., & Yan, F. (2018). Causal analysis to a subway accident: a comparison of STAMP and RAIB. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 160, p. 05002). EDP Sciences.

Zhou, Z., Irizarry, J., & Guo, W. (2021). A network-based approach to modeling safety accidents and causations within the context of subway construction project management. *Safety science*, 139, 105261.

Zhou, Z., Irizarry, J., & Li, Q. (2014). Using network theory to explore the complexity of subway construction accident network (SCAN) for promoting safety management. *Safety Science*, 64, 127-136.

Zhou, Z., Irizarry, J., & Zhou, J. (2021). Development of a database exclusively for subway construction accidents and corresponding analyses. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 111, 103852.

Referências

AEA. Os transportes desempenham um papel vital na sociedade e na economia. A nossa qualidade de vida depende de um sistema de transportes eficiente e acessível. Simultaneamente, os transportes são uma fonte fundamental de pressões ambientais na União Europeia (UE) e contribuem para as alterações climáticas, a poluição atmosférica e o ruído. Também ocupam grandes faixas de terra e contribuem para a expansão urbana, a fragmentação de habitats e a impermeabilização das superfícies. Disponível em: <https://www.eea.europa.eu/pt/themes/transport/intro> (acesso em 20 de Abril de 2022).

Ambros, J., Jurewicz, C., Turner, S., & Kieć, M. (2018). An international review of challenges and opportunities in development and use of crash prediction models. *European transport research review*, 10(2), 1-10.

Ambros, J., Valentová, V., & Sedoník, J. (2016). Developing updatable crash prediction model for network screening: case study of Czech two-lane rural road segments. *Transportation research record*, 2583(1), 1-7.

AMT. Relatório dos Sistemas de Metro em Portugal. Disponível em: https://www.amt-autoridade.pt/media/3324/relatorio_dos_sistemas_de_metro_2018-2020.pdf (acesso em 12 de Abril de 2022).

ASSOCIATION OF GERMAN TRANSPORT. (2000). *Light Rail in Germany*. Germany.

Barnatt, N., & Jack, A. (2018). Safety analysis in a modern railway setting. *Safety science*, 110, 177-182.

Barros, L. A. B. D. C. (2005). *Decisões de financiamento e de investimento das empresas sob a ótica de gestores otimistas e excessivamente confiantes* (Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo).

Baysari, M. T., Caponecchia, C., McIntosh, A. S., & Wilson, J. R. (2009). Classification of errors contributing to rail incidents and accidents: A comparison of two human error identification techniques. *Safety Science*, 47(7), 948-957.

Baysari, M. T., McIntosh, A. S., & Wilson, J. R. (2008). Understanding the human factors contribution to railway accidents and incidents in Australia. *Accident Analysis & Prevention*, 40(5), 1750-1757.

Bazerman e Moore, 2009 - BAZERMAN, M. H.; MOORE, D. *Processo decisório*. Rio de Janeiro: Campus, 2009.

Bowman, C. (1990). *The essence of strategic management*. Prentice Hall, London.

Cascetta, E. (2009). *Transportation systems analysis: models and applications* (Vol. 29). Springer Science & Business Media.

Chagas, D. M. (2011). *Estudo sobre fatores contribuintes de acidentes de trânsito urbano*.

Chang, L. Y. (2005). Analysis of freeway accident frequencies: negative binomial regression versus artificial neural network. *Safety science*, 43(8), 541-557.

Comissão Europeia. Disponível em: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/pt/IP_20_2528 (acesso em 03 de Junho de 2022).

- Currie, G., & Shalaby, A. (2007). Success and challenges in modernizing streetcar systems: Experiences in Melbourne, Australia, and Toronto, Canada. *Transportation Research Record*, 2006(1), 31-39.
- Currie, G., & Shalaby, A. (2008). Active transit signal priority for streetcars: experience in Melbourne, Australia, and Toronto, Canada. *Transportation Research Record*, 2042(1), 41-49.
- Currie, G., Delbosc, A., & Reynolds, J. (2012). Modeling dwell time for streetcars in Melbourne, Australia, and Toronto, Canada. *Transportation research record*, 2275(1), 22-29.
- Currie, G., Goh, K., & Sarvi, M. (2012, September). Exploring the impacts of transit priority measures using automatic vehicle monitoring (AVM) data. In *Australasian Transport Research Forum (ATRF)*, 35th.
- Deutsche Welle. Como trens podem ajudar Europa a atingir plano de reduzir emissões de CO2. Disponível em: - <https://www.poder360.com.br/internacional/como-trens-podem-ajudar-europa-a-atingir-plano-de-reduzir-emissoes-de-co2/> (acesso em 20 de Abril de 2022).
- Elvik, R. (2006). Laws of accident causation. *Accident Analysis & Prevention*, 38(4), 742-747.
- Elvik, R. (2010). Assessment and applicability of road safety management evaluation tools: Current practice and state-of-the-art in Europe. *Transportøkonomisk institutt*.
- Evans, A. W. (2011). Fatal accidents at railway level crossings in Great Britain 1946-2009. *Accident Analysis & Prevention*, 43(5), 1837-1845.
- Evans, A. W. (2013). The economics of railway safety. *Res Transp Econ* 43 (1): 137-147.
- Feigin, V. L., Roth, G. A., Naghavi, M., Parmar, P., Krishnamurthi, R., Chugh, S., ... & Study, R. F. (2016). Global burden of stroke and risk factors in 188 countries, during 1990-2013: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2013. *The Lancet Neurology*, 15(9), 913-924.
- Ferraz, C., Raia Junior, A., Bezerra, B., Bastos, T., & Silva, K. (2012). *Segurança Viária*. Suprema Gráfica e Editora.
- Fridstrøm, L. (2015). Disaggregate accident frequency and risk modelling. A rough guide. Report, 1403.
- Ghazel, M. (2009). Using stochastic Petri nets for level-crossing collision risk assessment. *IEEE transactions on intelligent transportation systems*, 10(4), 668-677.
- Ghazel, M., & El-Koursi, E. M. (2014). Two-half-barrier level crossings versus four-half-barrier level crossings: A comparative risk analysis study. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 15(3), 1123-1133.
- Gold, P. A. (1998). *Segurança de trânsito: aplicações de engenharia para reduzir acidentes*. BID.
- Goldstein, H. (2011). *Multilevel statistical models*. John Wiley & Sons.
- Guerrieri, M. (2018). Tramways in urban areas: an overview on safety at road intersections. *Urban Rail Transit*, 4(4), 223-233.
- Guo, G. (1996). Negative multinomial regression models for clustered event counts. *Sociological methodology*, 113-132.
- Hauer, E. (2004). Statistical road safety modeling. *Transportation Research Record*, 1897(1), 81-87.

Heinrich, H. W. (1941). *Industrial Accident Prevention. A Scientific Approach*. Industrial Accident Prevention. A Scientific Approach., (Second Edition).

IMT. Relatório Anual de Segurança Ferroviária. Disponível em: <https://www.imt-ip.pt/sites/IMTT/Portugues/IMTT/relatoriosectoriais/Documents/RASF%202020%20v1.1%20Final.pdf> (acesso em 12 de Abril de 2022).

Johnson, C. (1999). Why human error modeling has failed to help systems development. *Interacting with computers*, 11(5), 517-524.

Keller, J., (2002). Human performance modeling for discrete-event simulation: workload. In: *Simulation Conference, 2002. Proceedings of the Winter*, vol. 151, pp. 157-162.

Kim, D. G., Lee, Y., Washington, S., & Choi, K. (2007). Modeling crash outcome probabilities at rural intersections: Application of hierarchical binomial logistic models. *Accident Analysis & Prevention*, 39(1), 125-134.

Klockner, K., & Toft, Y. (2018). Railway accidents and incidents: Complex socio-technical system accident modelling comes of age. *Safety science*, 110, 59-66.

Korve, H. W., Farran, J. I., Mansel, D. M., Levinson, H. S., Chira-Chavala, T., & Ragland, D. R. (1996). Integration of light rail transit into city streets (No. Project A-5 FY'93).

Korve, H. W., Ogden, B. D., Siques, J. T., Mansel, D. M., Richards, H. A., Gilbert, S., ... & Hughes, R. G. (2001). Light rail service: pedestrian and vehicular safety.

Larouzee, J., & Le Coze, J. C. (2020). Good and bad reasons: The Swiss cheese model and its critics. *Safety science*, 126, 104660.

Leveson, N. G. (2011). *Engineering a safer world: Systems thinking applied to safety* (p. 560). The MIT Press, London.

Liu, B., Ghazel, M., & Toguyéni, A. (2015). Model-based diagnosis of multi-track level crossing plants. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 17(2), 546-556.

Lord, D., & Mahlawat, M. (2009). Examining Application of Aggregated and Disaggregated Poisson-Gamma Models Subjected to Low Sample Mean Bias. *Transportation research record*, 2136(1), 1-10.

Lord, D., & Mahlawat, M. (2009). Examining Application of Aggregated and Disaggregated Poisson-Gamma Models Subjected to Low Sample Mean Bias. *Transportation research record*, 2136(1), 1-10.

Lord, D., & Mannering, F. (2010). The statistical analysis of crash-frequency data: A review and assessment of methodological alternatives. *Transportation research part A: policy and practice*, 44(5), 291-305.

Lord, D., & Persaud, B. N. (2000). Accident prediction models with and without trend: application of the generalized estimating equations procedure. *Transportation Research Record*, 1717(1), 102-108.

Lord, D., Geedipally, S. R., & Guikema, S. D. (2010). Extension of the application of Conway-Maxwell-Poisson models: Analyzing traffic crash data exhibiting underdispersion. *Risk Analysis: An International Journal*, 30(8), 1268-1276.

Mccullagh, P., & Nelder, J. (1989). *Generalized linear models*. Chapman and Hall.

Mekki, A., Ghazel, M., & Toguyeni, A. (2012). Validation of a new functional design of automatic protection systems at level crossings with model-checking techniques. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 13(2), 714-723.

Metro do Porto. Mapa do Metro do Porto. Disponível em: <https://www.metrodoporto.pt/pages/337> (acesso em 11 de Fevereiro de 2022).

Miaou, S. P., & Song, J. J. (2005). Bayesian ranking of sites for engineering safety improvements: decision parameter, treatability concept, statistical criterion, and spatial dependence. *Accident Analysis & Prevention*, 37(4), 699-720.

Miaou, S. P., Song, J. J., & Mallick, B. K. (2003). Roadway traffic crash mapping: a space-time modeling approach. *Journal of transportation and Statistics*, 6, 33-58.

Mitra, S., & Washington, S. (2012). On the significance of omitted variables in intersection crash modeling. *Accident Analysis & Prevention*, 49, 439-448.

Nash, A. (2003). Implementing Zurich's transit priority program. *Transportation Research Record*, 1835(1), 59-65.

National Research Council (US). Transportation Research Board. Task Force on Development of the Highway Safety Manual, & Transportation Officials. Joint Task Force on the Highway Safety Manual. (2009). Highway safety manual (Vol. 1). AASHTO.

Naznin, F., Currie, G., & Logan, D. (2018). Exploring road design factors influencing tram road safety-Melbourne tram driver focus groups. *Accident Analysis & Prevention*, 110, 52-61.

NOAA. Nível de CO2 no ar é 50% maior do que da era pré-industrial, diz agência dos EUA... - Veja mais em <https://www.uol.com.br/tilt/noticias/afp/2022/06/03/nivel-de-co2-no-ar-e-50-maior-do-que-da-era-pre-industrial-diz-agencia-dos-eua.htm?cmpid=copiaecola>. Disponível em: <https://www.uol.com.br/tilt/noticias/afp/2022/06/03/nivel-de-co2-no-ar-e-50-maior-do-que-da-era-pre-industrial-diz-agencia-dos-eua.htm> (acesso em 03 de Junho de 2022).

Oh, J., Washington, S. P., & Nam, D. (2006). Accident prediction model for railway-highway interfaces. *Accident Analysis & Prevention*, 38(2), 346-356.

OMS. Billions of people still breathe unhealthy air: new WHO data. Disponível em: <https://www.who.int/news/item/04-04-2022-billions-of-people-still-breathe-unhealthy-air-new-who-data> (acesso em 20 de Abril de 2022).

Park, B. J., Lord, D., & Hart, J. D. (2010). Bias properties of Bayesian statistics in finite mixture of negative binomial regression models in crash data analysis. *Accident Analysis & Prevention*, 42(2), 741-749.

Pecheux, K. K. (2009). Light Rail Vehicle Collisions with Vehicles at Signalized Intersections (Vol. 79). Transportation Research Board.

Reason, J. (1990). Human error. Cambridge university press.

Reurings, M., Janssen, M., Eenink, R., Elvik, R., Cardoso, J., & Stefan, C. (2007). Accident Prediction Models and Road Safety Impact Assessment: a state-of-the-art. Institute for Road Safety Research.

Salmon, P. M., Cornelissen, M., & Trotter, M. J. (2012). Systems-based accident analysis methods: A comparison of Accimap, HFACS, and STAMP. *Safety science*, 50(4), 1158-1170.

Shahla, F., Shalaby, A. S., Persaud, B. N., & Hadayeghi, A. (2009). Analysis of transit safety at signalized intersections in Toronto, Ontario, Canada. *Transportation research record*, 2102(1), 108-114.

- Shankar, V. N., Ulfarsson, G. F., Pendyala, R. M., & Nebergall, M. B. (2003). Modeling crashes involving pedestrians and motorized traffic. *Safety Science*, 41(7), 627-640.
- Shorrock, S. T., & Kirwan, B. (2002). Development and application of a human error identification tool for air traffic control. *Applied ergonomics*, 33(4), 319-336.
- Silva, P. B. (2019). Modelos de previsão de acidentes em rodovia brasileira de pista dupla.
- Tegge, R. A., Jo, J. H., & Ouyang, Y. (2010). Development and application of safety performance functions for Illinois.
- Trams, Y. (2010). Tram Priority-Research. Modelling & Analysis of Tram Priority on the Melbourne Network.
- Underwood, P. (2013). Examining the systemic accident analysis research-practice gap (Doctoral dissertation, Loughborough University).
- VICROADS, 2012. Sharing the roads [Online].
- Vuchic, V. R. (2007). Urban transit systems and technology. John Wiley & Sons.
- Wang, J., & Fang, W. (2014). A structured method for the traffic dispatcher error behavior analysis in metro accident investigation. *Safety science*, 70, 339-347.
- Washington, S., Karlaftis, M., Mannering, F., & Anastasopoulos, P. (2020). Statistical and econometric methods for transportation data analysis. Chapman and Hall/CRC.
- Weigmann, D. A., & Shappell, S. A. (1997). Human factors analysis of postaccident data: Applying theoretical taxonomies of human error. *The international journal of aviation psychology*, 7(1), 67-81.
- Wickens, C.D. Multiple resources and mental workload. *Human Factors: J. Human Factors Ergonomics Soc.*, 50 (2008), pp. 449-455.
- Zhan, Q., Zheng, W., & Zhao, B. (2017). A hybrid human and organizational analysis method for railway accidents based on HFACS-Railway Accidents (HFACS-RAs). *Safety science*, 91, 232-250.
- Zhang, L., & Garoni, T. (2013). A comparison of tram priority at signalized intersections. arXiv preprint arXiv:1311.3590.
- Zhou, J. L., & Lei, Y. (2018). Paths between latent and active errors: Analysis of 407 railway accidents/incidents' causes in China. *Safety science*, 110, 47-58.
- Zhou, J. L., & Lei, Y. (2018). Paths between latent and active errors: Analysis of 407 railway accidents/incidents' causes in China. *Safety science*, 110, 47-58.
- Zhou, Y., & Yan, F. (2018). Causal analysis to a subway accident: a comparison of STAMP and RAIB. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 160, p. 05002). EDP Sciences.