

Segurança viária de túneis rodoviários: Estudo estatístico da BR-101 em Santa Catarina



Daniel Vieira Machado

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Centro Tecnológico (CTC),
Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil.
<https://orcid.org/0000-0002-8087-6090>

Victor Delegrego

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Centro Tecnológico (CTC),
Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil.
<https://orcid.org/0000-0002-4807-7432>

Andréa Cristina Konrath

Departamento de Informática e Estatística, Centro Tecnológico (CTC), Universidade
Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil.
<https://orcid.org/0000-0002-3742-5032>

Luiz Ricardo Nakamura

Departamento de Estatística, Instituto de Ciências Exatas e Tecnológicas (ICET),
Universidade Federal de Lavras, Minas Gerais, Brasil.
<https://orcid.org/0000-0002-7312-2717>

Vera do Carmo Comparsi de Vargas

Departamento de Informática e Estatística, Centro de Tecnologia (CTC), Universidade
Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil.
<https://orcid.org/0000-0002-1961-9546>

Recibido: 20/12/2022. Aceptado: 27/3/2023.

Resumo

A construção de túneis rodoviários é uma das soluções mais adequadas quando os trechos da estrada são de alto declive e traz diversos benefícios ambientais e econômicos. O tópico da segurança rodoviária de túneis e da análise de incidentes está ainda em desenvolvimento no campo da engenharia de tráfego internacional. O objetivo deste artigo é apresentar resultados de análises estatísticas sobre os dados de acidentes rodoviários brasileiros em túneis, comparando-os com os resultados obtidos para trechos em céu aberto nas mesmas vias, mais especificamente na BR-101 em Santa Catarina. Pretende-se que as informações sirvam de base sólida para fomentar e justificar as soluções de tráfego que trazem maior segurança para os usuários, tendo em vista também a comparação com os resultados internacionais.

PALAVRAS-CHAVE: ACIDENTE. TÚNEIS RODOVIÁRIOS. ESTATÍSTICA. SEGURANÇA.

Road safety in road tunnels: Statistical study of the BR-101 in Santa Catarina

Abstract

The construction of road tunnels is one of the most adequate solutions when road sections are steep and brings multiple environmental and economic benefits. The topic of road tunnel safety and incident analysis is still under development in the field of traffic engineering. The main goal of this paper is to present the results of statistical analyses conducted over Brazilian road traffic accidents data in tunnel sections, comparing them with the results obtained for open sections at the same roadway, more specifically in BR-101 in Santa Catarina. It is intended that the information can provide a solid basis to foster and justify traffic solutions which may bring greater safety to the users, keeping in mind also the comparison with international results.

KEYWORDS: ACCIDENT. ROAD TUNNELS. STATISTICS, SAFETY.

Introdução

Túneis são utilizados como solução viária em locais de topografia acidentada, onde há a necessidade ou desejo de transpor barreiras naturais. O projeto e a construção de túneis rodoviários é um componente essencial para a manutenção do serviço e segurança da via (Bassan, 2016).

De acordo com a Organização Mundial da Saúde, acidentes rodoviários tiram a vida de 1,25 milhão de pessoas todo ano, sendo também a principal causa de morte em jovens entre 15 e 29 anos (WHO, 2015). No contexto de túneis, a preocupação com os acidentes fatais é muito importante já que, apesar de menos frequentes, os acidentes em túneis podem ser mais graves. Outro fator de grande preocupação em um túnel é o aparecimento de incêndios, muitas vezes provocados por veículos, que podem potencializar os efeitos de acidentes (Vinicius *et al.*, 2021; Ntzeremes, Kirytopoulos e Leopoulos, 2020).

Para se compreender efetivamente os resultados de ações que visam aumentar a segurança nos túneis, uma das estratégias empregadas é a análise estatística da frequência de acidentes nos túneis. No entanto, ainda não há estudos suficientes que investigam as características dos acidentes de tráfego em túneis (Cheng *et al.*, 2020). Os trabalhos mais recentes, conduzidos em países da Europa, Ásia e Austrália, demonstram que os acidentes não ocorrem de maneira uniforme entre os tipos de veículos, locais do túnel e características dos condutores (Bassan, 2016; Borghetti *et al.*, 2020; Šrámek *et al.*, 2019).

Não obstante, em buscas conduzidas nos Periódicos da Capes e no Google Scholar, até a data de submissão não foram encontradas publicações brasileiras que sigam uma metodologia estatística de análise dos acidentes em túneis, como os artigos que serão posteriormente discutidos na Seção 2. Da mesma forma, os artigos internacionais mais atuais não fazem referência a publicações produzidas no Brasil, sendo que a maior concentração desses artigos é, atualmente, proveniente das regiões supracitadas. Portanto, há uma demanda nacional urgente de pesquisas nessa área.

Segurança viária de túneis rodoviários: Estudo estatístico...
DANIEL VIEIRA MACHADO ET AL.

Atualmente, a Confederação Nacional dos Transportes disponibiliza anualmente os resultados de análises que efetua sobre os números de acidentes registrados nas diversas regiões e Unidades Federativas (UF) brasileiras (CNT, 2020). Isso inclui compilados dos números de acidentes por ano nas BRs, com segmentação por tipo de veículo, tipo de acidente, dia da semana, sexo e faixa etária dos acidentados. No entanto, não demonstram em que quilometragem da via ocorreram esses acidentes. Essa visão agregada não é suficiente para uma análise dos efeitos de túneis internos às vias, pois é essencial que o local preciso do acidente esteja registrado.

Para a geração de um resultado comparável às publicações internacionais sobre acidentes em regiões de túneis, ou que inicie a discussão no contexto nacional, é preciso que a análise seja feita sobre uma base com dados que registre o local do acidente de forma mais precisa, incluindo detalhes como condições da via, tipo do acidente, características dos veículos e condutores, dentre outros.

Dessa maneira o objetivo da pesquisa é a comparação da segurança viária dos túneis da BR-101 no Estado de Santa Catarina em relação à mesma via externa ao túnel, por meio de uma análise descritiva, exploratória e inferencial. Os resultados da pesquisa são tanto de natureza descritiva, apresentando resultados ainda não discutidos, quanto propositora, recomendando um formato de avaliação que possa ser replicado para outros túneis federais no Brasil.

Fundamentação teórica

O amplo uso de túneis rodoviários em trechos de alto declive, principalmente em alguns países como os da região nórdica, motivou pesquisas sobre sua segurança em relação aos trechos comuns de via aberta. Nesses estudos foi visto que a taxa de acidentes em túneis não é significativamente pior que a de um trecho aberto (Bassan, 2016). No entanto, a experiência levantou o questionamento do impacto dos túneis na gravidade desses acidentes. Amundsen e Ranes (2000) conduziram um estudo com o objetivo de responder a esse questionamento no contexto Norueguês, visto que lá já havia mais de 900 túneis em uso e o assunto da segurança tornara-se de interesse público. Como base de dados, os autores utilizaram relatórios policiais de feridos em acidentes em vias nacionais, com identificação precisa de todos os locais dos acidentes. Essa base incluía dados de quatro anos, pela qual foi possível avaliar 587 túneis.

Amundsen e Ranes (2000) fizeram uma distinção entre zonas dos trechos de túneis (Figura 1) fundamentados em estudos anteriores na Noruega, a saber:

- Zona 1: 50 primeiros metros na área externa aos túneis;
- Zona 2: primeiros 50 metros dentro dos túneis (para cada entrada/saída);
- Zona 3: próximos 100 metros dentro dos túneis;
- Zona 4: área intermediária restante no interior do túnel.

Caso o túnel não fosse grande o bastante, somente as zonas de índices mais baixos eram consideradas.

Segurança viária de túneis rodoviários: Estudo estatístico...
DANIEL VIEIRA MACHADO ET AL.

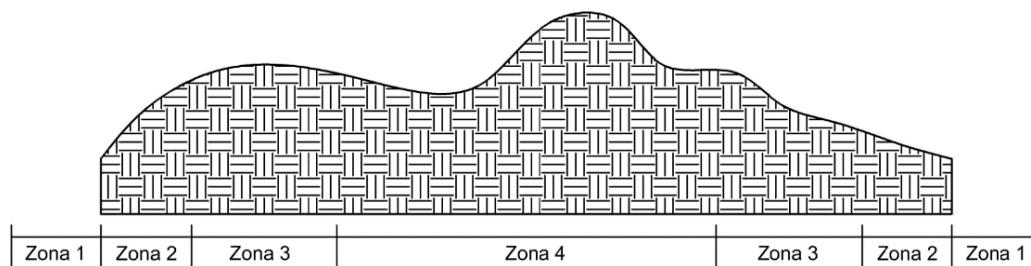


Figura 1. Zonas dos túneis. Fonte: Adaptado de Amundsen e Ranæs (2000).

Uma análise dos resultados demonstrou que a Zona 1 era responsável pela maior média de acidentes. Já a Zona 4 foi vista como a mais segura, uma vez que se observaram quase quatro vezes menos acidentes que a Zona 1. Ao mesmo tempo, a Zona 4 foi a que apresentou maior potencial de fatalidade dentre os acidentes, acima de 30%. Esses valores foram obtidos após ajustes pelo volume de tráfego anual de cada túnel.

Até os dias atuais foram efetuadas novas pesquisas internacionais sobre a segurança em túneis inspiradas na divisão por zonas, tanto em túneis rodoviários (Ren *et al.*, 2019) quanto urbanos (Yeung e Wong, 2013), e alguns padrões tendem a se repetir mesmo entre diferentes países. É geralmente na entrada/saída do túnel que a maioria dos acidentes acontecem e estão principalmente ligados à mudança de luminosidade (Jiao *et al.*, 2021) e noção de espaço (Zhao *et al.*, 2020). Ainda, Bassan (2016) identificou que a variabilidade da extensão de cada Zona em diferentes estudos era devido, principalmente, a mudanças de velocidade, padrão de direção e condições físicas do túnel e da via.

Apesar do uso de metodologias diferentes para a classificação de zonas, Bassan (2016) pôde comparar estatisticamente os resultados ao tentar unificar as definições em categorias maleáveis. Assim, foram identificados fatores concordantes das pesquisas de diferentes países que influenciariam na segurança, como o desenho geométrico, iluminação, requisitos estruturais, coeficiente de atrito, reação dos condutores, impactos do sistema de ventilação e elementos complementares de segurança. Algumas das preocupações levantadas pela literatura internacional são:

- Dirigir próximo a paredes do túnel, a existência de um teto no túnel e túneis longos podem gerar apreensão e estresse no motorista. Chen *et al.* (2020) expandem o argumento avaliando o uso de decoração nas paredes internas dos túneis e Kolla, Adamová e Demčáková (2021) dão sugestões para o reprojeto de pontos mais críticos;
- Mesmo que leves, gradientes no túnel podem causar um comportamento diferente de maquinários e veículos pesados, o que pode levar a mais acidentes. Um efeito semelhante ocorre com curvaturas de raio pequeno (Amundsen, 2009);
- Em zonas de gelo e neve o risco também aumenta, mesmo que dentro do túnel, pois há a tendência de transporte do material para a primeira zona interna ao túnel (Caliendo, De Guglielmo e Russo, 2019);
- Acidentes graves estão altamente correlacionados com o envolvimento de veículos de carga pesada, com uma média superior a 70% em alguns estudos (Beard, 2010; Ren *et al.*, 2019);

Segurança viária de túneis rodoviários: Estudo estatístico...
DANIEL VIEIRA MACHADO ET AL.

- Incêndios em túneis são frequentemente causados por acidentes (Ntzeremes, Kirytopoulos e Leopoulos, 2020), mas em alguns estudos as falhas mecânicas e elétricas foram mais representativas desse tipo de incidente (Nævestad e Meyer, 2014).

A melhoria dos sistemas de ventilação e políticas de conscientização dos motoristas são algumas das melhores medidas para evitar feridos por incêndios em túneis (Król e Król, 2021; Ren *et al.*, 2019).

No Brasil há normas que determinam os sistemas de prevenção e combate a incêndios conforme as características geométricas do túnel, localização (urbana ou rural) e situação (subterrâneo ou submerso) (ABNT, 2021, 2022). Há também as instruções normativas que complementam as normas e são dependentes da unidade federativa de origem.

No Estado de Santa Catarina, por exemplo, há a IN 01 (CBMSC, 2022), que exige para túneis acima de 500 metros: brigada de incêndio; controle de fumaça; extintores; hidráulico preventivo; instalação elétrica de baixa tensão; saídas de emergência; sinalização de emergência; sistema de comunicação; plano de emergência e proteção estrutural. Detecção automática de incêndio e sistema de circuito de TV são exigências adicionais para os túneis com mais de 1000 metros de extensão.

Os veículos na contramão e pedestres na faixa de rodagem são emergências mitigáveis com sistemas de monitoramento ativo (Šrámek, Danišovič e Hodoň, 2019), sinalização (Zhang *et al.*, 2021) e a presença de saídas horizontais e verticais (Xie *et al.*, 2020).

Evitar mortes e acidentes não é somente uma questão humana, mas também tem uma dimensão econômica, envolvendo os custos de produtividade perdida, custo moral, custos médicos e custos gerais (materiais) (Caliendo e De Guglielmo, 2012). Tais efeitos podem ser ainda exacerbados em famílias e baixa renda, como demonstrado em análise de acidentes na Índia (Nanjunda, 2021). Quanto mais rico em dados são os registros dos acidentes mais é possível investigar os efeitos das diferentes condições do túnel, clima e trânsito nos acidentes. Caliendo, De Guglielmo e Russo (2019) combinaram dados policiais com fatores meteorológicos em suas análises, concluindo que muitas variáveis ambientais e visuais e de qualidade da via têm influência sobre os acidentes, mas que a má condução dos veículos ainda é o maior fator de risco.

Materiais e métodos

Área de estudo

A área de estudo encontra-se no estado brasileiro de Santa Catarina. O estado apresenta uma malha rodoviária federal de aproximadamente 2.345 quilômetros. As duas principais rodovias federais do estado são a BR-101 e a BR-282. No ano de 2021, Santa Catarina foi o segundo estado do Brasil com maior incidência de acidentes de trânsito (7.882 ocorrências), atrás apenas do Estado de Minas Gerais (8.308), segundo os dados da Polícia Rodoviária Federal (Brasil, 2021). Analisando a área de estudo, a BR-101 é a única rodovia federal no Estado de Santa Catarina que apresenta túneis.

Segurança viária de túneis rodoviários: Estudo estatístico...
DANIEL VIEIRA MACHADO ET AL.

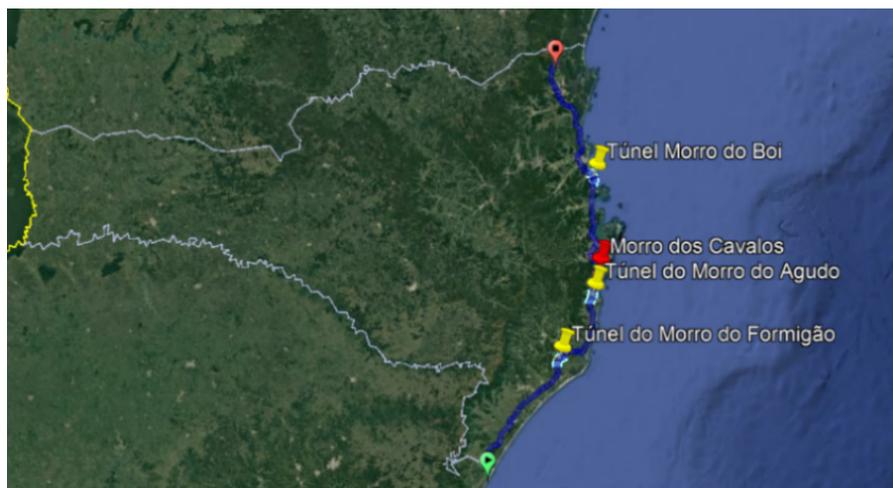


Figura 2. Trecho analisado e localização dos túneis. Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

A Figura 2 mostra a localização da BR-101 e também os três túneis objetos do estudo localizados nos morros do Boi, Agudo e do Formigão, além do Morro dos Cavalos, em que há a proposta de um novo túnel.

A BR-101 no Estado de Santa Catarina se estende do quilômetro 0 até o 465. Durante um período de análise de cinco anos entre 2016 até 2020 foram registrados 3.303 acidentes, resultando em 662 mortes (Brasil, 2021). Os dados, em quantidades absolutas, encontram-se apresentados na Figura 3, para cada quilometro da via.

Conforme indicado pela Figura 4, a via apresenta trechos com frequências de acidentes bastante diferentes ao longo de sua extensão. O trecho com maior número de acidentes é o da cidade de São José na Grande Florianópolis, próximo ao quilômetro 200, seguido pela região próxima à Balneário Camboriú e ao Morro do Boi, no quilômetro 135 (Brasil, 2021).

A grande maioria dos acidentes da BR-101 apresenta pelo menos um ferido (72,01% do total) e, conforme retratado na Figura 4, os acidentes com menos de dois feridos totalizam 96,41% das observações. A média de feridos por acidente é de 0,95 e desvio padrão de 0,839 (coeficiente de variação igual a 0,879). Há uma forte concentração do número de feridos à esquerda do gráfico (coeficiente de assimetria igual a 1,940) e longa cauda à direita, evidenciado, do ponto de vista estatístico, pelo elevado valor do coeficiente de curtose (13,246).

Em 97,19% dos acidentes não são registradas mortes. A média de fatalidades é de 0,031 mortes por acidente, com desvio padrão igual a 0,191 (coeficiente de variação correspondente a 6,24). O comportamento assimétrico da distribuição das mortes é similar ao de feridos (Figura 4), isto é, com concentração de valores à esquerda (coeficiente de assimetria igual a 7,789) e com caudas pesadas (coeficiente de curtose igual a 85,490).

Segurança viária de túneis rodoviários: Estudo estatístico...
 DANIEL VIEIRA MACHADO ET AL.

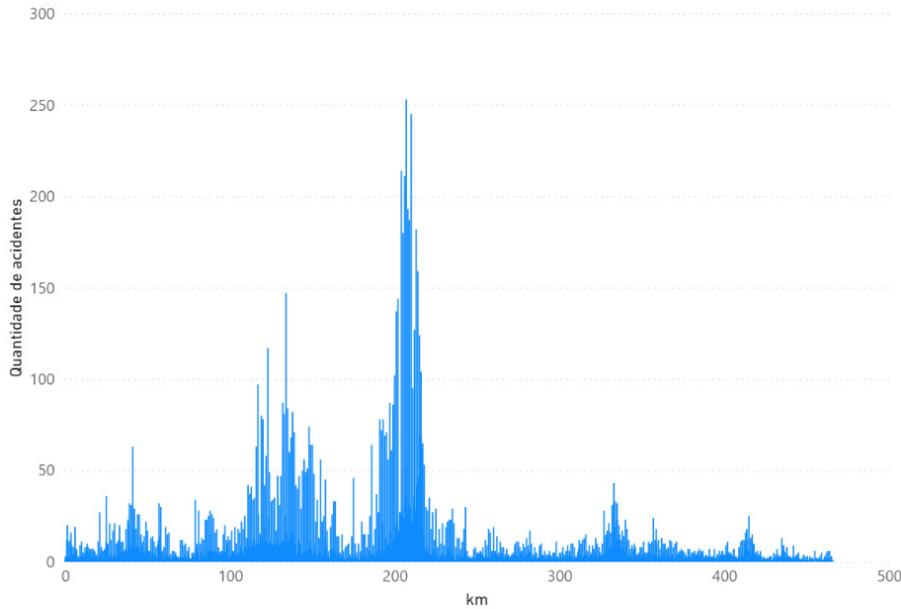


Figura 3. Número de acidentes ocorridos por quilômetro na BR-101 em Santa Catarina. Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

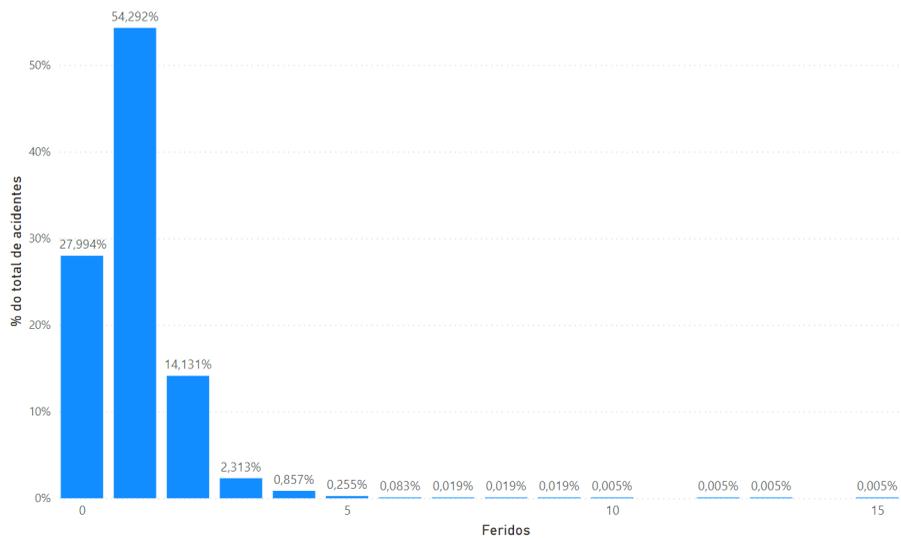


Figura 4. Percentual de acidentes vs. feridos por acidente. Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

Dados

Neste artigo foram utilizados os dados provenientes da Polícia Rodoviária Federal (PRF) brasileira, disponibilizados em planilhas na sua base de dados abertos na web (Brasil, 2021). Foram selecionados os dados dos últimos cinco anos completos de 2016 até 2020, de acidentes ocorridos no Estado de Santa Catarina na rodovia BR-101, onde todos os túneis de administração federal estão localizados, culminando em um total de 21.577 ocorrências.

Segurança viária de túneis rodoviários: Estudo estatístico...
DANIEL VIEIRA MACHADO ET AL.

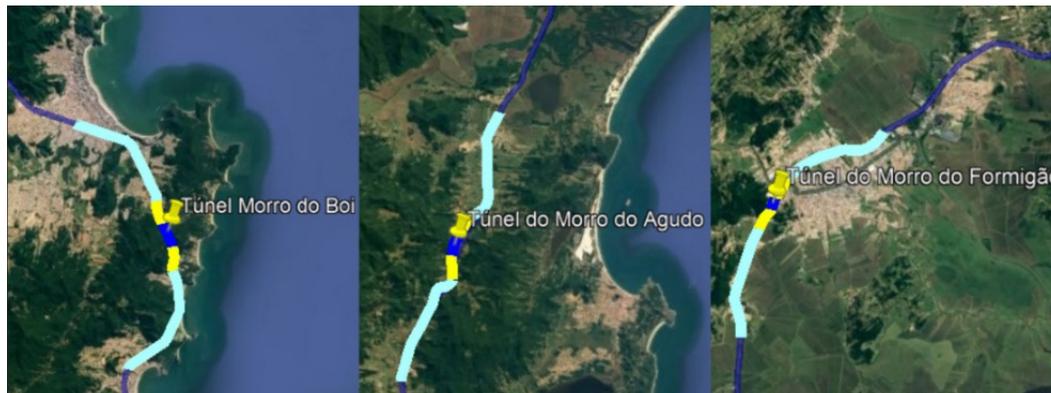


Figura 5. Túneis analisados. Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

Método de Análise

Para garantir a precisão e validade dos resultados, foi proposta uma metodologia de categorização dos dados da PRF que pode ser replicada para qualquer análise semelhante de túneis baseada nesses mesmos registros federais. Cada linha na planilha de acidentes recebeu uma coluna extra de “Zona” com uma letra de categorização da maneira correspondente:

- No túnel: entrada imediata e dentro do túnel, precisão no hectômetro;
- No local do túnel com precisão no quilômetro;
- Local imediatamente fora do túnel, precisão no hectômetro. Esse trecho vai até o próximo quilômetro acima e abaixo às entradas do túnel;
- No mesmo setor da via e sentido que o túnel: entre 1 e 5 km do início ou fim do túnel, arbitrando-se assim o trecho de relevo e condições da via no morro que mais correspondem aos do túnel.

Tal categorização permite avaliar sistematicamente toda a zona de influência do túnel e apontar o efeito do túnel no aumento ou redução de acidentes. A Figura 5 demonstra para os túneis avaliados como cada Zona se diferencia na via: no centro, a Zona A em cor azul escuro, imediatamente fora do túnel as Zonas B e C em amarelo, e mais externamente, a Zona D em azul claro. Buscou-se ainda direcionar as análises para responder as perguntas específicas:

- Há diferença no padrão de acidentes entre a região adjacente aos túneis e à interna/entrada dos túneis?
- Há diferença no padrão de acidentes entre seções internas/entrada dos túneis?
- Há diferença no padrão de acidentes entre os túneis no estado?
- Quais fatores que afetam a sinistralidade desses túneis?

Em uma região exemplo dentro da via estudada e com alto relevo, que tipo de melhoria na segurança poderia se esperar com a implantação de um túnel?

Para as comparações de segurança viária no túnel e entre túneis, foram usadas médias referentes a 100 m de via como base para aplicações de técnicas estatísticas com as seguintes variáveis: número de acidentes, feridos, feridos graves e mortos a cada 100

Segurança viária de túneis rodoviários: Estudo estatístico...
DANIEL VIEIRA MACHADO ET AL.

m. Assim, pôde-se comparar dados de diferentes túneis independentemente dos seus tamanhos. Visto que as regiões de estudo são trechos curtos e sem acessos relevantes ao tráfego, assumiu-se que o tráfego era uniforme em cada trecho.

Em relação às análises estatísticas, o estudo foi dividido em duas etapas. Na primeira etapa foi realizada uma análise descritiva e exploratória sobre os dados. Na segunda, a fim de verificar se os grupos constituídos pelas quatro zonas de caracterização dos túneis apresentam diferenças significativas, foram empregados testes de hipóteses. Para esses dados não foram confirmadas a suposição de normalidade e, por este motivo, aplicou-se o teste não-paramétrico de Wilcoxon (maiores detalhes em Montgomery e Runger (2021) e Vieira (2018)) comparando a zona A com cada uma das outras zonas delimitadas, uma a uma. O nível de significância adotado em todas as análises foi de 5%. Todas as análises foram realizadas com auxílio do software R (R Core Team, 2021).

A partir da média das variáveis analisadas dos três túneis, foi possível projetar o efeito da construção de um túnel no trecho do Morro dos Cavalos (também na BR-101 de Santa Catarina), de acordo com essas métricas de acidentes.

Resultados

Após tomar como referência os dados gerais da rodovia BR-101, partiu-se para a análise individual de cada túnel presente na rodovia. O padrão de concentração de dados à esquerda, apresentado na Figura 4, se repete quando as regiões de túneis são estudadas isoladamente, com a maioria de feridos igual a um e sem fatalidades nos registros de acidentes. Ainda, verificou-se que não há a presença de acidentes com um número discrepante de feridos ou mortos que pudesse distorcer a análise pelas médias.

Túnel do Morro do Boi

O setor em que se encontra o Túnel do Morro do Boi é o segundo mais perigoso da rodovia em termos de frequência de acidentes (Figura 4). Pôde-se ainda confirmar pelo teste de Wilcoxon que há mais feridos por acidente na região do Morro do Boi (com média igual a 1,020; desvio padrão igual a 0,808 e coeficiente de variação igual a 0,791) do que visto em média na BR-101 como um todo (valor $p < 0,05$). No entanto, a média de mortes é menor no setor (0,019, com desvio padrão igual a 0,148 e coeficiente de variação correspondente a 7,860) quando comparada à média da via (valor $p < 0,05$). O total de acidentes registrados entre os trechos A e D foram 583.

A Tabela 1 demonstra a análise de segurança do túnel do Morro do Boi (Zona A) em comparação às outras regiões no trecho de influência do túnel. Os resultados com um asterisco indicam que os valores para a distribuição na Zona A foram menores e com dois asteriscos foram iguais.

Segurança viária de túneis rodoviários: Estudo estatístico...
DANIEL VIEIRA MACHADO ET AL.

Tabela 1. Comparações de segurança entre Zonas no Morro do Boi. Símbolos: (*) Pior que Zona A; (**) Igual Zona A. Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

Zonas	Média (/100)			
	Acidentes	Feridos	Feridos Graves	Mortos
A	1,200	1,350	0,300	0,000
B	3,200	2,800*	0,300**	0,000**
C	1,450	1,800*	0,150**	0,150*
D	5,030	5,100*	0,845*	0,080*

Os resultados apresentados na Tabela 1 apontam que a Zona A - isto é, no túnel -, se trata da mais segura, por apresentar uma média de acidentes (1,200) inferior às outras Zonas e menor média para a variável feridos (1,350). Em comparação à variável feridos graves, os resultados do teste de Wilcoxon não apresentaram diferença significativa entre as Zonas A quando comparado às B e C, sendo apenas a Zona D apontada como mais perigosa a um nível de 5% de significância. Por fim, a quantidade de mortos para as Zonas A e B (zero) foi significativamente inferior à das regiões C e D.

O Túnel do Morro do Boi apresenta uma média de acidentes com chuva maior no seu interior (31,25%) do que na zona imediatamente fora (17,24%).

Túnel do Morro do Agudo

A região do Túnel do Morro do Agudo foi a que apresentou as menores taxas de acidentes entre os túneis analisados. Os resultados e as comparações validadas pelo teste de Wilcoxon, utilizando um nível de 5% de significância, são apresentadas na Tabela 2. A Zona A demonstrou ser a mais segura por apresentar as menores taxas, com exceção para os acidentes com vítimas fatais, que foi igual para as Zonas B e C (zero). Para este túnel, a Zona C foi a que apresentou as maiores taxas de acidentes assim como de feridos. O total de acidentes registrados entre as Zonas A e D foram 154.

Tabela 2. Comparações de segurança entre Zonas no Morro do Agudo. Símbolos: (*) Pior que Zona A; (**) Igual Zona A. Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

Zonas	Média (/100m)			
	Acidentes	Feridos	Feridos Graves	Mortos
A	1,000	0,375	0,000	0,000
B	1,400	0,900*	0,200*	0,000**
C	1,450	1,300*	0,150*	0,000**
D	1,010	1,020*	0,255*	0,001*

Os tipos de acidentes que mais ocorreram foram colisão traseira e colisão com objeto estático, perfazendo 50% das ocorrências. A média de acidentes em períodos de chuva não diferiu significativamente entre a região do túnel (Zona A) e as adjacentes. No

Segurança viária de túneis rodoviários: Estudo estatístico...
DANIEL VIEIRA MACHADO ET AL.

entanto, 75% dos acidentes registrados com tempo úmido (isto é, chuva ou garoa/chuvisco) ocorreram nas zonas de entrada/saída da região A.

Túnel do Morro do Formigão

O Túnel do Morro do Formigão foi o único que apresentou índices de acidentes maiores na Zona A em comparação às Zonas B e C adjacentes, conforme a Tabela 3. Ao mesmo tempo, a parte interna do túnel se apresentou como a mais segura quando a gravidade dos acidentes foi avaliada, já que possui taxas de feridos, feridos graves e mortos significativamente inferiores às outras Zonas. O total de acidentes registrados entre as Zonas A e D foi de 329.

Tabela 3. Síntese dos resultados para o Túnel do Morro do Formigão. Símbolos: (*) Pior que Zona A; (**) Igual Zona A. Fonte: *Elaborado pelos autores (2022)*.

Média (/100)				
Zonas	Acidentes	Feridos	Feridos Graves	Mortos
A	2,250	1,000	0,125	0,000
B	1,300	0,300**	0,100**	0,000**
C	1,600	1,390*	0,339*	0,042*
D	2,350	2,061*	0,389*	0,045*

A média de feridos graves da Zona A contou com um valor incomum de dois feridos graves em um único acidente, já que 98,4% dos acidentes da via têm menos de dois feridos graves. O teste Wilcoxon com nível de significância de 5% sugere que mesmo assim a Zona A é a mais segura. No entanto, escolheu-se considerar de forma conservadora que as Zonas A e B apresentaram resultados semelhantes.

Morro dos Cavalos

No trecho sul da BR-101 em Santa Catarina localiza-se o Morro dos Cavalos. Trata-se de um local que apresenta uma das mais altas frequências de acidentes da via (Brasil, 2021). Como característica da região pode-se abordar brevemente sua taxa de inclinação longitudinal acentuada como também raios de curvatura reduzidos que não estão de acordo com o padrão utilizado na duplicação da rodovia. Como alternativa, foi proposta inicialmente a construção de um túnel. No entanto, por interesses de grupos e burocracia governamental, principalmente envolvendo a questão da demarcação de Terras Indígenas Guaranis, o tema foi postergado (Brandão, 2018). A Figura 6 mostra o traçado atual da BR-101 em vermelho que sofre influência do Morro dos Cavalos (região cinza) e em amarelo um possível trajeto para o túnel proposto.

Aplicando nesse trecho o mesmo padrão de categorização em letras, agora de maneira teórica, foi possível analisar os dados do trecho atual, com potencial de ser atendido por um túnel de 2 km. A média de acidentes para cada 100 m é de 4,380 entre as categorias A e B, 3,100 para a C e 2,340 para a D. O mais evidente é o valor muito elevado de ocorrências nos trechos tipo A e B, onde o túnel será construído caso a obra venha a ser executada. As frequências por acidente de feridos (média de 0,876 e desvio padrão igual a 0,917, resultando em um coeficiente de variação de 1,05) ou mortos (média

Segurança viária de túneis rodoviários: Estudo estatístico...
DANIEL VIEIRA MACHADO ET AL.



Figura 6. Alternativa de traçado para túnel no Morro dos Cavalos.
Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

de 0,029 e desvio padrão igual a 0,209, com coeficiente de variação de 7,21) não são significativamente diferentes que as de outras regiões avaliadas a um nível de 5% de significância.

Caso o padrão estatístico visto para os outros túneis fosse confirmado também nesse, hipótese exibida na Tabela 4, os acidentes graves no trecho poderiam ser reduzidos em média 77%, o que teria significado a inexistência de 24 dos 31 acidentes graves registrados em cinco anos levando apenas em consideração a zona A. Da mesma forma, as mortes no trecho poderiam ser potencialmente reduzidas quase a zero.

Tabela 4 – Síntese comparativa entre as Zonas A e D para todos túneis e Morro dos Cavalos.
Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

Túnel	% de variação da taxa de acidentes/100m em relação ao trecho D				
	VMDA	Acidentes	Feridos	Feridos Graves	Mortes
Morro do Boi	26086	-76%	-74%	-64%	-100%
Morro do Agudo	16026	-1%	-63%	-100%	-100%
Morro do Formigão	16675	-4%	-51%	-68%	-100%
Morro dos Cavalos	Previsão	-27%	-63%	-77%	-100%
	Desvio Padrão	35%	9%	16%	0%

DISCUSSÃO

Ao final das análises foi possível realizar uma comparação direta entre os valores encontrados para as variáveis estudadas nas Zonas A (interno ao túnel) até a D (mesma região,

Segurança viária de túneis rodoviários: Estudo estatístico...
DANIEL VIEIRA MACHADO ET AL.

mas com menor influência do túnel). Fica evidente na síntese apresentada na Tabela 4 que os túneis influenciaram diretamente na redução do número de feridos, feridos graves e mortos nos trechos estudados. O túnel do Morro do Boi, em especial, apresentou a maior redução no número de acidentes, possivelmente por ter um volume de tráfego maior em comparação aos outros, conforme o apresentado por Bassan (2016). Pode-se concluir que os túneis de Santa Catarina se mostram mais seguros que as vias na mesma região quando se observa a gravidade das ocorrências e mostram um comportamento misto quando se analisa o total de acidentes. Ainda, a projeção dos resultados para o Morro dos Cavalos sugere a construção de um túnel nesse trecho da via.

As análises revelaram que a premissa de que a Zona A é a mais segura pode não ser verdade em casos particulares. Em específico, os índices de acidentes mais altos na Zona A do Túnel do Morro do Formigão podem ter ocorrido por ele ser menor que os outros dois túneis anteriores, cujos resultados estão apresentados nas Seções 4.2 e 4.3, e apresentar uma parcela maior de sua extensão nas áreas de entrada/saída, que são, em geral, as mais propensas a acidentes e podem se prolongar por até 300 m dependendo das características do tráfego. Para o Túnel do Morro do Agudo, as maiores taxas de acidentes na Zona C levantam questões sobre uma eventual deficiência do projeto geométrico da rodovia neste trecho e problemas de alteração brusca de visibilidade.

Conforme esperado, os pontos de entrada/saída foram locais de atenção quanto aos acidentes, já que todos os primeiros/últimos 200 m apresentaram registros de ocorrência. Mesmo assim, nem sempre foram maiores que os verificados internamente ao túnel, o que difere da tendência reportada para outros túneis em trabalhos internacionais, como em Yeung e Wong (2013). Outra observação foi uma média de acidentes maior no interior do Túnel do Morro do Boi em horas chuvosas. Mesmo que não chova dentro do túnel a água trazida pelos pneus reduz o coeficiente de atrito e promove acidentes (Amundsen, 2009).

Não foi possível nesse trabalho determinar zonas internas ao túnel conforme apresentado por diversos autores (Lu *et al.*, 2014). Isso se deve principalmente à falta de túneis no estado, com uma população de somente três túneis federais. Outro fator é a precisão máxima de um hectômetro no registro da PRF, sendo que outros autores utilizam uma precisão mínima de 50 m para suas análises (Caliendo, De Guglielmo e Russo, 2019).

As constatações apresentadas colocam os túneis do estado em uma boa posição quando comparados aos dados da literatura internacional. Isso porque, enquanto é comum que túneis apresentem uma redução variável na quantidade de acidentes, há diversos fatores construtivos dessas estruturas que as tornam potencialmente mais perigosas e suscetíveis a casos graves. Pode-se então afirmar que a construção seletiva de túneis com o mesmo padrão construtivo dos já presentes na BR-101 em Santa Catarina tem grande potencial de salvar vidas.

Conclusão

O presente artigo teve como objetivo realizar uma análise estatística da segurança viária para os túneis rodoviários existentes na BR-101 em Santa Catarina, que se trata

Segurança viária de túneis rodoviários: Estudo estatístico...
DANIEL VIEIRA MACHADO ET AL.

de um tema de grande relevância que, até o presente momento, não foi abordado na literatura brasileira.

Para a elaboração do artigo foram utilizados dados disponibilizados pela Polícia Rodoviária Federal de acidentes ocorridos em rodovias federais entre os anos de 2016 e 2020. Os arquivos foram analisados e categorizados para a área de interesse, restrita apenas aos acidentes ocorridos no trecho da BR-101 em Santa Catarina. Os túneis presentes na área de interesse foram avaliados tanto individualmente, segundo a sua localização (quilometragem), quanto em conjunto.

Propôs-se ainda uma metodologia de categorização dos trechos na zona de influência dos túneis que possibilite a futura expansão do estudo, para outros estados e rodovias federais com túneis. Com a classificação dos dados foram elaborados os cálculos das médias de acidentes, concebidos conforme a extensão de cada trecho assim como o número de acidentes ocorridos. Esses valores foram utilizados como base para desenvolver as análises estatísticas das variáveis abordadas e promover comparações entre os trechos dos túneis.

Os resultados obtidos na pesquisa demonstram que os túneis de Santa Catarina na BR-101 são estruturas que garantem grande proteção aos condutores, especialmente em casos de acidentes com potenciais vítimas e feridos. Em todas as regiões de túneis avaliadas os trechos mais afastados foram também os que apresentaram maiores médias de acidentes, assim como de feridos, feridos graves e mortos. Isto leva a crer que sem a utilização dos túneis o número de acidentes na rodovia seria provavelmente maior. Um caso potencial de nova construção de um túnel foi levantado para um trecho específico da rodovia em estudo, localizada no Morro dos Cavalos. Argumentou-se aqui que a alta incidência de acidentes no trecho poderia ser substancialmente reduzida pela construção de um túnel, de forma a replicar as tendências positivas averiguadas nos três túneis já existentes.

Os dados revelaram também que os túneis em estudo apresentaram algumas características que diferem do descrito usualmente na literatura internacional. Diferentemente das análises encontradas entre as bibliografias internacionais, os resultados obtidos no presente artigo não explicitam que o número de acidentes seja superior na região de transição entre túnel e rodovia aberta. Da mesma forma, os acidentes dos túneis na BR-101 em Santa Catarina tenderam a ser menos letais que as vias abertas adjacentes, de forma que não houve nenhuma morte registrada especificamente dentro de um dos túneis. Também há outros padrões de acidentes que não se conformam com os geralmente reportados para túneis. A razão por trás dessas diferenças pode ser estudada em futuros trabalhos e se sugere aqui observar as boas práticas construtivas e de design como potenciais fatores causais dessa alta segurança observada, assim como o estudo de todos os túneis em rodovias federais no Brasil, tendo como base o mesmo método apresentado.

Referências

- » Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (2022). ABNT NBR 17027 Proteção contra incêndio em túneis submersos - Requisitos.
- » ABNT. (2021). ABNT NBR 15661. Proteção contra incêndio em túneis rodoviários e urbanos. Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- » Amundsen, F. H. (2009). *Studies on Norwegian Road Tunnels II: An analysis on traffic accidents in road tunnels 2001-2006*. E-book Statens Vegvesen. <https://vegvesen.brage.unit.no/vegvesen-xmlui/handle/11250/192582>
- » Amundsen, F. H., y Ranæs, G. (2000). Studies on traffic accidents in Norwegian road tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 15(1), 3-11.
- » Bassan, S. (2016). Overview of traffic safety aspects and design in road tunnels. *IATSS Research*, 40(1), 35-46.
- » Beard, A. N. (2010). Tunnel safety, risk assessment and decision-making. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 25(1), 91-94.
- » Borghetti, F. et al. (2020). Safety in road tunnels: accident data analysis of the Italian motorway A24 and A25. *Chemical Engineering Transactions*, 82, 307-312.
- » Brandão, V. (abril de 2018). Indústria competitiva, sociedade desenvolvida. *Indústria e Competitividade*, 15, 2. https://issuu.com/fiescpublicacoes/docs/ic_fiesc15_revisao_final Acesso em 29/05/2022.
- » Brasil (2021) *Polícia Rodoviária Federal – Acidentes* [Data set]. Recuperado de <https://www.gov.br/prf/pt-br/acesso-a-informacao/dados-abertos/dados-abertos-acidentes>
- » Caliendo, C. y De Guglielmo, M. L. (2012). Accident rates in road tunnels and social cost evaluation. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 53, 166-177.
- » Caliendo, C.; De Guglielmo, M. L. y Russo, I. (2019). Analysis of crash frequency in motorway tunnels based on a correlated random-parameters approach. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 85, 243-251.
- » CBMSC (2022). In 1- parte 2: Procedimentos administrativos sistemas e medidas de segurança contra incêndio e pânico. En *Normas de Segurança Contra Incêndio*. Secretaria de Estado da Segurança Pública Corpo de Bombeiros Militar.
- » Chen, P. et al. (2020). Examining the influence of decorated sidewalls in road tunnels using fMRI technology. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 99, 103362.
- » Cheng, W. et al. (2020). Exploring the modeling and site-ranking performance of Bayesian spatiotemporal crash frequency models with mixture components. *Accident Analysis and Prevention*, 135, 105357.
- » Confederação Nacional do Transporte (CNT) (2020). *Painel CNT de Consultas Dinâmicas dos Acidentes Rodoviários* [Data set]. <https://www.cnt.org.br/painel-acidente>.
- » Jiao, F. et al. (2021). Entrance zone length of extra-long undersea tunnels based on vision adaptation. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 113, 103970.

Segurança viária de túneis rodoviários: Estudo estatístico...
DANIEL VIEIRA MACHADO ET AL.

- » Kolla, E.; Adamová, V. y Demčáková, L. (2021). Geometry influence of far-side wall of tunnel emergency bay on the traffic safety. *Transportation Research Procedia*, 55, 1712-1719.
- » Król, A. y Król, M. (2021). Numerical investigation on fire accident and evacuation in a urban tunnel for different traffic conditions. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 109, 103751.
- » Lu, L. et al. (2014). Statistical analysis of traffic accidents in shanghai river crossing tunnels and safety countermeasures. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2014, 1-7.
- » Montgomery, D. C. y Runger, G. C. (2021). *Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros* (7th ed.). LTC Editora.
- » Nævestad, T. O. y Meyer, S. (2014). A survey of vehicle fires in Norwegian road tunnels 2008-2011. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 41(1), 104-112.
- » Nanjunda, D. C. (2021). Impact of socio-economic profiles on public health crisis of road traffic accidents: A qualitative study from South India. *Clinical Epidemiology and Global Health*, 9, 7-11.
- » Ntzeremes, P.; Kirytopoulos, K. y Leopoulos, V. (2020). Development of a risk-based method for predicting the severity of potential fire accidents in road tunnels based on real-time data. *Environmental Research*, 189, 109895.
- » R Core Team (2022). The R Project for Statistical Computing [Online]. <https://www.r-project.org/>.
- » Ren, R. et al. (2019). Statistical analysis of fire accidents in Chinese highway tunnels 2000-2016. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 83, 452-460.
- » Šrámek, J.; Danišovič, P. y Hodoň, M. (2019). Evaluation and analysis of emergency events in road tunnels. *Transportation Research Procedia*, 40, 1571-1575.
- » Vieira, S. (2018). *Bioestatística: tópicos avançados* (4th ed.). Elsevier.
- » Sylvério, M. V. M.; Serafini, R. y Alves, G. P. (2021). Metodologia de avaliação de revestimentos de concreto projetado durante incêndios em túneis. 5o Congresso Brasileiro de Túneis e Estruturas Subterrâneas (5o CBT)At: São Paulo, Brasil.
- » World Health Organization (WHO) (2015). Global status report on road safety 2015. *Injury Prevention*, 19(2), 150.
- » Xie, B. et al. (2020). Experimental study on vertical evacuation capacity of evacuation slide in road shield tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 97, 103250.
- » Yeung, J. S. y Wong, Y. D. (2013). Road traffic accidents in Singapore expressway tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 38, 534-541.
- » Zhang, Y. et al. (2021). The effect of technical installations on evacuation performance in urban road tunnel fires. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 107, 103608.
- » Zhao, E. Z. et al. (2020). The impact of LED color rendering on the dark adaptation of human eyes at tunnel entrances. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(5), 1566.

Segurança viária de túneis rodoviários: Estudo estatístico...
DANIEL VIEIRA MACHADO ET AL.

Daniel Vieira Machado / danielvm.eng@gmail.com

Possui graduação em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Santa Catarina (2020). Tem experiência na área de Engenharia Civil, com ênfase em Infraestrutura de Transportes.

Victor Delegregó / victordelegregó@hotmail.com

Possui graduação sanduíche em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Santa Catarina (2017), com período sanduíche na University of Bath, Reino Unido (2016).

Andréa Cristina Konrath / andreack@gmail.com

Possui graduação em Matemática Aplicada e Computacional pela Universidade de Santa Cruz do Sul – UNISC (2000), mestrado em Engenharia de Produção pela Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC (2002) e doutorado em Engenharia Mecânica pela UFSC (2008). Desde agosto de 2011 é professora adjunta na UFSC, pertencendo ao Departamento de Informática e Estatística, na qual ministra disciplinas de Estatística na graduação e pós-graduação.

Luiz Ricardo Nakamura / luiz.nakamura@ufla.br

Possui graduação em Estatística pela Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP (2009), mestrado em Ciências (Estatística e Experimentação Agrônômica) pela Universidade de São Paulo – USP (2011) e doutorado em Ciências (Estatística e Experimentação Agrônômica) pela USP (2016), com período sanduíche na London Metropolitan University (Londres, Reino Unido). Atualmente é Professor Adjunto do Departamento de Estatística da Universidade Federal de Lavras – UFLA.

Vera do Carmo Comparsi de Vargas / veradocarmo@gmail.com

Possui graduação em Licenciatura Plena de Ciências, Habilitação em Matemática pela Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões (URI, 1992), especialização em Matemática pela URI (1995), mestrado em Engenharia de Produção pela Universidade Federal de Santa Maria (2001) e doutorado em Engenharia de Produção pela Universidade Federal de Santa Catarina (2007). Atualmente é professora de Estatística no Departamento de Informática e Estatística do Centro Tecnológico da UFSC.