



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES E
GESTÃO TERRITORIAL

Daniel Vieira Machado

Proposta de Método para Análise Socioeconômica Ex-Ante de Túneis Rodoviários

Florianópolis

2024

Daniel Vieira Machado

Proposta de Método para Análise Socioeconômica Ex-Ante de Túneis Rodoviários

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes e Gestão Territorial da Universidade Federal de Santa Catarina para a qualificação do curso de Mestrado em Engenharia de Transportes
Orientador: Prof. Marcos Aurélio Marques Noronha, Dr.

Florianópolis

2024

Ficha de identificação da obra

Machado, Daniel Vieira

Proposta de método para análise socioeconômica ex-ante de túneis rodoviários / Daniel Vieira Machado ; orientador, Marcos Aurélio Marques Noronha, 2024.
102 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes e Gestão Territorial, Florianópolis, 2024.

Inclui referências.

1. Engenharia de Transportes e Gestão Territorial. 2. Sistemas de Transporte. 3. Túneis Rodoviários. 4. Análise Socioeconômica. 5. Microsimulação. I. Noronha, Marcos Aurélio Marques. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes e Gestão Territorial. III. Título.

Daniel Vieira Machado

Proposta de Método para Análise Socioeconômica Ex-Ante de Túneis Rodoviários

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Camila Belleza Maciel Barreto, Dra.

Laboratório de Transportes e Logística – LabTrans/UFSC

Prof. Rafael Pacheco dos Santos, Dr.

Universidade do Estado de Santa Catarina

Prof. Eduardo Lobo, Dr.

Universidade Federal de Santa Catarina

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de mestre em Engenharia de Transportes.

Prof. Rogerio Cid Bastos, Dr.

Coordenação do Programa de Pós-Graduação

Prof. Marcos Noronha, Dr.

Orientador

Florianópolis, 2024

*Dedico este trabalho, com eterna gratidão, às
minhas avós, Adalci de Brito e Maria Mendes Machado,
por todo amor e incentivo para acreditar em meus sonhos.*

Agradecimentos

Primeiramente a Deus, por ser sempre minha fonte de força e esperança.

À Universidade Federal de Santa Catarina, especificamente ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes e Gestão Territorial (PPGTG), pela oportunidade em oferecer um curso de mestrado gratuito e de qualidade, que me proporcionou crescimento intelectual e pessoal.

Ao meu orientador Marcos Aurélio Marques Noronha por todos os ensinamentos e orientações prestados durante este curso de pós-graduação.

À banca examinadora, pelos excelentes conselhos e correções que contribuíram para o aprimoramento desta dissertação.

Ao Laboratório de Transportes e Logística (LabTrans) da Universidade Federal de Santa Catarina, pela disponibilidade ao acesso *STARS* e ao empréstimo de equipamentos, que foram essenciais para a elaboração desta pesquisa. E à Dra. Camila Belleza Maciel Barreto por todo o apoio técnico à esta pesquisa.

À Secretaria de Estado de Infraestrutura de Santa Catarina e ao Comando de Polícia Militar Rodoviária de Santa Catarina pela disponibilização de dados cruciais para a pesquisa.

À minha mãe, Alessandra Kelli Vieira Machado e à minha avó, Adalci de Brito, por me incentivarem a não desistir desta pesquisa, perante a muitos desafios e momentos de incredulidade em minha própria capacidade.

Agradeço à minha amada e companheira, Carine Machado Pereira, por ser meu porto seguro e ter compreendido os momentos em que estive ausente para me dedicar a esta pesquisa.

Aos meus amigos, especialmente ao Tiago Augusto Pianezzer, Camila Freitas dos Santos, Vitória Vicente Coltri e Evelin Pereira e Wesley de Carvalho, que me incentivaram e me apoiaram tecnicamente para a elaboração deste trabalho.

Aos meus cachorrinhos amados e companheiros, Rocky e Kovu, por toda companhia em madrugadas de estudos.

A todos que contribuíram a este trabalho, meu muito obrigado!

“Tudo posso naquele que me fortalece” (Filipenses 4:13)

RESUMO

O desenvolvimento social e tecnológico proporcionou ao mundo a necessidade de promover e aprimorar os sistemas de transporte. A demanda por meios mais rápidos e eficientes de locomoção, afetou a dinâmica de ocupação do solo, que com o passar do tempo, necessitou se remodelar. Atualmente, problemas de locomoção são comuns em cidades e capitais do Brasil e do mundo. Desta forma, surge a necessidade da realização de novos empreendimentos que amplifiquem a capacidade do sistema de transporte. A tomada de decisão sobre a seleção de possíveis projetos de engenharia, muitas vezes é realizada de maneira superficial e direta por gestores públicos, sem a participação efetiva da comunidade. Desta forma, o presente estudo possui o objetivo de propor um método para promover a análise socioeconômico ex-ante para túneis rodoviários. Este método tem como objetivo final apresentar para a sociedade, para os gestores públicos e para academia, uma ferramenta que possa elucidar os principais impactos sociais que acarretam as obras de infraestrutura, no caso específico, os túneis rodoviários. Desta forma, a aplicação do método proposto proporciona informações simples e diretas que podem elucidar a sociedade e os tomadores de decisão sobre os impactos sociais de novos empreendimentos. Para a construção do método, foram propostos métodos de cálculo para a valoração dos principais impactos diretos atrelados aos empreendimentos de túneis rodoviários. No decorrer do presente trabalho, foi realizado um estudo de caso, a partir da aplicação do método proposto, para a cidade de Florianópolis. Como resultado, a aplicação do método apresentou a valoração dos principais impactos diretos sugeridos e uma análise socioeconômica para o empreendimento sugerido pela prefeitura local. Ao término deste trabalho, foi possível constatar a aplicabilidade do método proposto. Além disso, os resultados proporcionados pelo estudo de caso pode se tornar uma ferramenta para elucidar a sociedade florianopolitana dos principais impactos proporcionados pelo empreendimento.

Palavras-chave: Sistemas de Transporte. Análise Socioeconômica. Túneis Rodoviários. Microssimulação. iRAP.

ABSTRACT

Social and technological development has created the need to promote and improve transportation systems worldwide. The demand for faster and more efficient means of transportation has affected land use dynamics, which, over time, required remodeling. Currently, transportation problems are common in cities and capitals of Brazil and around the world. Thus, the need arises for new ventures that can increase the capacity of the transportation system. Decision-making regarding the selection of possible engineering projects is often carried out in a superficial and direct manner by public managers, without the effective participation of the community. Therefore, this study aims to propose a method to promote ex-ante socioeconomic analysis for road tunnels. The ultimate goal of this method is to present to society, public managers, and academia a tool that can elucidate the main social impacts brought by infrastructure works, specifically road tunnels. Thus, the application of the proposed method provides simple and direct information that can inform society and decision-makers about the social impacts of new ventures. To construct the method, calculation methods were proposed for valuing the main direct impacts associated with road tunnel ventures. In the course of this work, a case study was conducted using the proposed method for the city of Florianópolis. As a result, the application of the method provided the valuation of the main suggested direct impacts and a socioeconomic analysis for the venture proposed by the local government. At the end of this work, it was possible to verify the applicability of the proposed method. Furthermore, the results provided by the case study can become a tool to inform the people of Florianópolis about the main impacts brought by the venture.

Keywords: Transportation Systems. Socioeconomic Analysis. Road Tunnels. Microsimulation. iRAP

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Descrição da pesquisa científica.....	20
Figura 2 - Fluxograma para análise dos benefícios.....	29
Figura 3 – Quadro de exemplos de benefícios.....	30
Figura 4 – Mudanças de abordagem da Segurança Viária.....	33
Figura 5 – Etapas da abordagem sistêmica.....	35
Figura 6 – Etapas da metodologia iRAP.....	36
Figura 7 – Níveis da Classificação por Estrelas por Usuário da Via.....	36
Figura 8 – Fluxograma de estudos ambientais.....	43
Figura 9 – Ilustração do funcionamento do <i>Brunel's Shield</i>	47
Figura 10 – Localização do Emboque.....	49
Figura 11 – Demonstração de aplicação do método RQD.....	51
Figura 12 – Guia para elaboração de projeto de sistemas de contenção.....	55
Figura 13 – Ábaco do Sistema Q de Barton.....	59
Figura 14 – Descrição dos componentes de uma tuneladora.....	62
Figura 15 – Etapas de elaboração do método proposto.....	64
Figura 16 – Localização da área de interesse.....	78
Figura 17 - Mapa geológico da Ilha de Florianópolis.....	80
Figura 18 – Possível traçado final para o túnel.....	81
Figura 19 – Caracterização da via analisada.....	82
Figura 20 – Classificação por estrelas para o trecho da rodovia SC-404.....	86
Figura 21 – Classificação por Estrelas para o trajeto do túnel.....	86
Figura 22 – Regressão linear para estimar o <i>Opex</i>	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dissertações com aderência ao tema proposto.....	22
Tabela 2 – Estimativa de precisão para contagem manual	42
Tabela 3 – Classificação RQD	52
Tabela 4 – Classificação RMR.....	54
Tabela 5 – Primeira parte dos parâmetros de Barton	57
Tabela 6 – Segunda parte dos parâmetros de Barton	58
Tabela 7 – Sinistros rodoviários na SC-404.....	83
Tabela 8 – Tempo de viagem para cada ano de análise	84
Tabela 9 – Valoração do tempo de viagem anual	85
Tabela 10 – Pontuação de risco.....	87
Tabela 11 – Valoração da segurança viária	88
Tabela 12 – Custos de implantação para o Túnel do Morro do Formigão.....	89
Tabela 13 – Cálculo da análise socioeconômica.....	92

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CNT – Confederação Nacional do Transporte

PLAMUS – Plano de Mobilidade Urbana Sustentável

RQD – *Rock Quality Designation*

RMR – *Rock Mass Rating*

NATM - *New Austrian Tunnelling Method*

TBM - *Tunnel Boring Machine*

ACB – Análise de Custo-Benefício

WTP - *Willingness to pay*

TER – Taxa de Retorno Econômica

VSPL – Valor Social Presente Líquido

TSD – Taxa Social de Desconto

ASV – Auditorias de segurança Viária

TCT – Técnica de Análise de Conflitos de Tráfego

iRAP - *International Road Assessment Program*

SRS – *Star Rating Score*

VMD – Volume Médio Diário

FHP – Fator Horário de Pico

VHP – Volume Horário de Projeto

RPAA - Relatório Preliminar de Avaliação Ambiental

EIA - Estudo de Impacto Ambiental

PBA - Plano Básico Ambiental

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura Terrestre

AMOLAGOA - Associação de Moradores da Lagoa da Conceição

LabTrans - Laboratório de Transportes e Logística

STARS – *Smart Technology to Advanced Road Safety*

SIE - Secretaria de Estado da Infraestrutura e Mobilidade

SRE - Sistema Rodoviário Estadual

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	JUSTIFICATIVA.....	16
1.2	OBJETIVOS.....	18
1.2.1	Objetivo Geral	18
1.2.2	Objetivos Específicos.....	18
1.3	Limitações do trabalho	19
1.4	Metodologia científica.....	20
1.5	Organização do trabalho.....	21
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	24
2.1	AVALIAÇÃO SOCIOECONÔMICA	24
2.1.1	Análise de Custo-Benefício	24
2.1.1.1	<i>Valor Social Presente Líquido</i>	<i>26</i>
2.1.1.2	<i>Taxa de Retorno Econômica</i>	<i>26</i>
2.1.1.3	<i>Taxa Social de Desconto</i>	<i>27</i>
2.1.1.4	<i>Índice Benefício-Custo</i>	<i>27</i>
2.1.2	Benefícios.....	28
2.1.3	Custos	31
2.1.3.1	<i>Custos de Investimento (Capex).....</i>	<i>31</i>
2.1.3.2	<i>Custos de Operação (Opex)</i>	<i>32</i>
2.2	SEGURANÇA VIÁRIA.....	32
2.2.1	Métodos de avaliação	34
2.2.2	Metodologia iRAP	35
2.3	ESTUDOS DE TRÁFEGO	37
2.3.1	Termos e Definições.....	37
2.3.1.1	<i>Capacidade.....</i>	<i>38</i>
2.3.1.2	<i>Tempo de Viagem</i>	<i>38</i>

2.3.1.3	<i>Velocidade Média de Viagem</i>	38
2.3.1.4	<i>Volume Médio Diário (VMD)</i>	38
2.3.1.5	<i>Nível de Serviço</i>	39
2.3.1.6	<i>Fator Horário de Pico (FHP)</i>	39
2.3.1.7	<i>Volume Horário de Projeto (VHP)</i>	39
2.3.2	Coleta de Dados	39
2.3.3	Fatores de Expansão	40
2.4	IMPACTOS AMBIENTAIS	43
2.5	TÚNEIS.....	45
2.5.1	Breve Histórico	45
2.5.2	Terminologia básica	47
2.5.2.1	<i>Seção Transversal</i>	47
2.5.2.2	<i>Arco Invertido</i>	48
2.5.2.3	<i>Plano de Fogo</i>	48
2.5.2.4	<i>Pilão</i>	48
2.5.2.5	<i>Alargamento</i>	48
2.5.2.6	<i>Emboque</i>	49
2.5.2.7	<i>Carregamento e Detonação</i>	49
2.5.2.8	<i>Tempo de Autossustentação</i>	49
2.5.2.9	<i>Perfuração</i>	50
2.5.2.10	<i>Sistema de Escoramento e Revestimento</i>	50
2.5.3	Classificação Geomecânica	50
2.5.3.1	<i>Sistema RQD</i>	51
2.5.3.2	<i>Sistema RMR</i>	53
2.5.3.3	<i>Sistema Q de Barton</i>	55
2.5.4	Métodos Construtivos	59

2.5.4.1	<i>Drill and Blast</i>	59
2.5.4.2	<i>NATM</i>	60
2.5.4.3	<i>TBM</i>	61
2.5.4.4	<i>Cut-and-Cover</i>	62
3	PROPOSTA DE MÉTODO	64
3.1	OBTENÇÃO DOS DADOS	65
3.1.1	Tráfego	65
3.1.2	Sinistros Rodoviários	66
3.1.3	Meio Ambiente	67
3.1.4	Projeto do Túnel	68
3.2	VALORAÇÃO DO TEMPO DE VIAGEM	68
3.2.1	Nível de Serviço	69
3.2.2	Tempo de Viagem	70
3.2.3	Definição do Valor do Tempo	70
3.3	VALORAÇÃO DA SEGURANÇA VIÁRIA.....	71
3.3.1	Métodos de Valoração da Segurança Viária	72
3.4	VALORAÇÃO DOS IMPACTOS AMBIENTAIS	73
3.4.1	Dados e Métodos para a Valoração dos Impactos Ambientais	74
3.5	ESTIMATIVA DE CUSTOS	75
3.5.1	<i>Capex</i>	75
3.5.2	<i>Opex</i>	75
3.6	ANÁLISE SOCIOECONÔMICA	76
4	ESTUDO DE CASO	77
4.1	COLETA DE DADOS	77
4.1.1	Área de Estudo	77
4.1.2	Entrevista com AMOLAGOA	78
4.1.3	Geologia	79
4.1.4	Projeto do Túnel	81

4.1.5	Dados de Tráfego.....	81
4.1.6	Sinistros Rodoviários	83
4.2	VALORAÇÃO DO TEMPO DE VIAGEM	83
4.3	VALORAÇÃO DA SEGURANÇA VIÁRIA.....	85
4.4	VALORAÇÃO DOS IMPACTOS AMBIENTAIS	88
4.5	ESTIMATIVA DE CUSTOS	88
4.5.1	Capex.....	89
4.5.2	Opex	90
4.6	RELAÇÃO BENEFÍCIO/CUSTO	91
4.7	ANÁLISE SÓCIOECONÔMICA.....	91
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	93
6	PROPOSTAS PARA NOVOS ESTUDOS	94
	Referências	95

1 INTRODUÇÃO

A mobilidade urbana é tema de discussões e pesquisas em diversos países do mundo. Congestionamentos, filas e engarrafamentos fazem parte do cotidiano da população mundial. Trata-se de um problema social que afeta a qualidade de vida da população, principalmente no contexto urbano. Desta forma, surge a necessidade da ampliação da capacidade dos sistemas de transportes. No Brasil, usualmente a tomada de decisão sobre a realização de novos empreendimentos de infraestrutura, é promovida de maneira direta dos gestores públicos.

Mohr (2019) desenvolveu um estudo, em sua dissertação de mestrado, no qual apresenta uma proposta de método inclusivo sobre a tomada de decisão, denominado “BE PART”. O autor descreve que a tomada de decisão usualmente é realizada de maneira individual e que, possivelmente, pode acarretar a prevalência de interesses de alguns grupos sobre a coletividade. Então, um dos pontos de sua proposta, é a inclusão de todos os *stakeholders*, envolvidos no tema, na avaliação de empreendimento.

O Ministério da Economia (Brasil, 2021) elaborou um guia para a realização de estudos socioeconômicos para a elaboração de análises de projetos de infraestrutura. O guia apresenta os principais pontos a serem avaliados na concepção da análise. Entretanto, no documento, não foram apresentados de maneira clara os principais métodos de valoração dos impactos envolvidos na realização de um novo empreendimento.

Desta forma, o presente estudo apresentará uma proposta de método para a elaboração de avaliações socioeconômicas para túneis rodoviários. O principal objetivo do método é de promover uma ferramenta simples e direta que possa promover a valoração dos principais impactos diretos de túneis rodoviários. Assim, com a aplicação do método, será possível apresentar para todos os *stakeholders* a valoração desses impactos e os seus efeitos em valor presente.

Além disso, no decorrer da pesquisa, será elaborado um estudo de caso para a cidade de Florianópolis. A cidade possui diversos pontos críticos de mobilidade. A partir do modelo de urbanização adotado na cidade, a disponibilidade por espaços para a realização de obras de infraestrutura, como por exemplo, a construção de novas vias ou ampliação de vias existentes, se torna limitada. Entre os principais pontos de alta concentração de congestionamentos em Florianópolis, pode ser citada a ligação viária entre os bairros do

Itacorubi e a Lagoa da Conceição pela rodovia estadual SC-404. Como características, a via possui um trecho na qual atravessa o Morro da Lagoa da Conceição, com elevações acima de 7% que dificultam a mobilização de veículos pesados. Atualmente a Prefeitura Municipal de Florianópolis abriu um processo licitatório no qual busca a contratação de uma empresa para a elaboração de um projeto de túnel rodoviário que transpassará o Morro da Lagoa da Conceição. Machado (2019) elaborou um estudo preliminar no qual apresentou alternativas para a construção de um túnel conectando os bairros do Itacorubi e Lagoa da Conceição.

No estudo de caso, será realizada uma análise socioeconômica ex-ante para o túnel proposto pela Prefeitura de Florianópolis. No decorrer da aplicação do método, serão apresentados os métodos de cálculo para a obtenção da valoração dos impactos diretos utilizados na análise. Desta forma, ao fim do estudo, será apresentada para a sociedade local os resultados esperados para o empreendimento em questão.

1.1 JUSTIFICATIVA

Atualmente no Brasil o transporte de cargas e passageiros é realizado em sua maior parte pelo modal rodoviário. Segundo o Boletim Estatístico (2019) elaborado pela CNT (Confederação Nacional do Transporte), mais de 61% da matriz nacional do transporte de cargas é realizado por rodovias. No âmbito do transporte de passageiros, este número se torna ainda mais expressivo, principalmente em comparação com o transporte ferroviário. A frota de veículos existente no Brasil em 2021 era de aproximadamente 111 milhões, em que o número de automóveis representava 64%, segundo o Painel do Transporte Rodoviário (2021). Estes valores demonstram como a matriz nacional de transporte é dependente do modal rodoviário e o número expressivo de automóveis vigente.

Teixeira et al. (2014) elaboraram um estudo sobre a qualidade do transporte público na cidade de São Paulo. Os autores afirmam que o desenvolvimento urbano está extremamente conectado com a evolução do transporte público. Ademais, seus resultados demonstram que a capacidade da infraestrutura não atende a demanda local de modo a garantir conforto aos usuários. Sobretudo, os entrevistados afirmam que preferem utilizar o metrô ao ônibus devido a confiabilidade e condições de operação.

Devido aos problemas de tráfego presentes na região metropolitana de Florianópolis, foi elaborado um Plano de Mobilidade Urbana Sustentável (PLAMUS, 2015)

pelo governo estadual. Neste plano, foram coletadas informações sobre o fluxo de tráfego e dados socioeconômicos da região, dos quais foram utilizados para a concepção de propostas de intervenção no sistema de transporte existente. Entre essas propostas, encontra-se a construção de um Túnel rodoviário localizado no Morro da Lagoa da Conceição. Após a execução de simulações de tráfego empregando os dados coletados, os autores demonstram em seus resultados que o tempo de viagem na macrozona foi de aproximadamente 15%. Os resultados são ainda mais expressivos com o uso de corredores de transporte coletivo com faixas exclusivas.

Conforme enfatizado por Almeida (2001), o município de Florianópolis possui grande potencialidade para a realização de obras de infraestrutura subterrânea devido suas características geológicas. Além disso, no decorrer de sua tese, a autora demonstra locais da cidade em que poderiam ser construídos túneis rodoviários, entre eles encontra-se o maciço do Morro da Lagoa da Conceição. Ademais, também é retratada a possibilidade de construção de estações de tratamento de água e esgoto, armazenamento e distribuição de água como também instalação de equipamentos de infraestrutura. Também segundo Almeida, o uso do espaço subterrâneo no Morro da Lagoa da Conceição seria ideal para resolver problemas de contaminação do lençol freático, que já foram detectados por especialistas.

Entretanto, em entrevistas, moradores do bairro da Lagoa da Conceição questionam a necessidade e a efetividade da construção de um túnel no local. Alguns afirmam que a verba pública que seria gasta para a obra, poderia ser alocada em outras problemáticas do bairro como saneamento básico e recuperação de espaços públicos danificados.

A partir desta problemática, fica evidente a necessidade de estudos que tenham como objetivo elucidar para a sociedade florianopolitana, os impactos esperados pela obra para a cidade. Assim, a população e os gestores municipais, terão mais informações consistentes para constituir uma opinião pública mais assertiva sobre o projeto.

1.2 OBJETIVOS

A seguir serão apresentados os objetivos do presente trabalho.

1.2.1 Objetivo Geral

Desenvolver um método simplificado para realizar análise socioeconômica ex-ante para túneis rodoviários.

1.2.2 Objetivos Específicos

- a) Identificar todos os elementos envolvidos na concepção de um túnel rodoviário a serem avaliados para a análise socioeconômica ex-ante de túneis rodoviários;
- b) Avaliar os parâmetros de cálculo e alguns dos métodos possíveis para estimar a valoração dos impactos diretos envolvidos na análise socioeconômica ex-ante de túneis rodoviários.
- c) Avaliar a aplicabilidade do método proposto em um estudo de caso, em Florianópolis, para o Túnel do Morro da Lagoa da Conceição.

1.3 LIMITAÇÕES DO TRABALHO

Devido à extensão e à complexidade do tema que será abordado no presente trabalho, serão apresentadas algumas considerações que delimitarão a extensão da problemática e seus derivados. São elas:

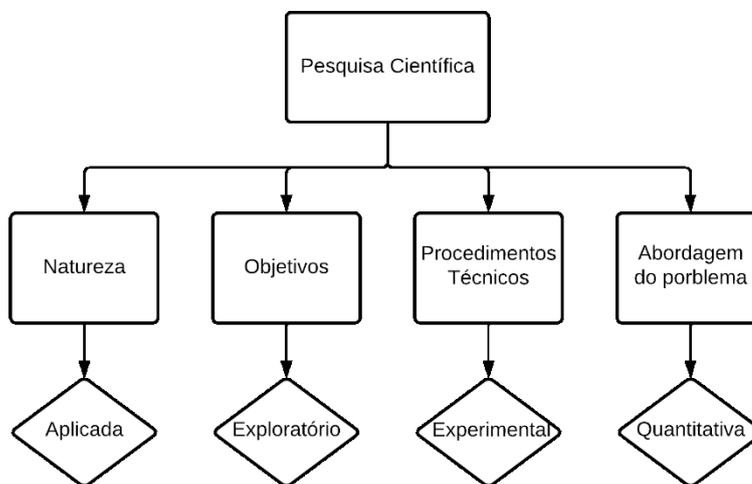
- a) Os benefícios levados em consideração no âmbito da análise econômica do presente estudo serão aqueles de primeira ordem (diretos). Serão eles: tempo de viagem, impactos ambientais e de segurança viária. Não serão levados em consideração os efeitos de segunda ordem.
- b) Para os impactos ambientais será levado em consideração o valor definido pelo DNIT através dos Custos Médios Gerenciais
- c) Análise de risco realizada no estudo de caso se limitará à variação dos custos de implantação do túnel.
- d) Por se tratar de uma análise econômica ex-ante, e sem a presença de um projeto final do empreendimento em questão, os custos CAPEX e OPEX serão projetados conforme dados disponibilizados na literatura, já que não há disponibilidade de tempo para elaboração de um projeto com tamanho detalhamento. Ademias, efeitos financeiros como “preço sombra” não serão levados em consideração.

1.4 METODOLOGIA CIENTÍFICA

Do ponto de vista da avaliação de técnicas de pesquisa científica, é relevante que o presente trabalho seja descrito conforme os seus parâmetros. A partir das definições propostas por Prodanov e Freitas (2013), os estudos científicos devem ser classificados conforme a sua natureza, seus objetivos, seus procedimentos técnicos e sua maneira de abordagem.

A presente dissertação apresenta a natureza de pesquisa aplicada. Sobre seus objetivos, pode ser caracterizado como uma pesquisa exploratória. Sobre os procedimentos técnicos que serão apresentados ao longo do texto, pode-se avaliar previamente que se trata de uma pesquisa experimental, elaborada juntamente com pesquisa bibliográfica e de campo. Por fim, ao avaliar a abordagem do problema discutido, é possível caracterizá-lo como quantitativo. A descrição da metodologia é apresentada na Figura 1.

Figura 1 – Descrição da pesquisa científica



Fonte: Autor (2023)

1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho está estruturado em 6 capítulos, sendo este primeiro introdutório. Os demais capítulos serão descritos a seguir:

Capítulo 2 – Fundamentação teórica – Este capítulo irá apresentar referências encontradas na literatura sobre o tema de interesse. Resumidamente, serão apresentados os principais conceitos necessários para a compreensão do presente trabalho.

Capítulo 3 – Método – O método utilizado para o desenvolvimento desta dissertação será apresentado neste capítulo, seguindo cada etapa definida. Estas etapas serão subdivididas e explanadas para a facilitar a compreensão do texto.

Capítulo 4 – Estudo de caso – Neste capítulo será realizado um estudo de caso para o Túnel do Morro da Lagoa da Conceição, aplicando o método proposto.

Capítulo 5 – Considerações finais – Após a realização completa do presente estudo, será abordada as principais conclusões sobre o tema.

Capítulo 6 – Propostas para temas para estudos futuros - Serão propostos possíveis temas complementares ao atual para continuação de pesquisa.

1.6 ADERÊNCIA AO PPGTG

Esta dissertação trata da avaliação socioeconômica de túneis rodoviários. Como tal, está inserida na área de concentração Sistemas de Transporte e na linha de pesquisa de Planejamento dos Sistemas de Transporte. No PPGTG, esta linha trata de avaliar e adequar as necessidades de transporte para uma região a partir de suas características estruturais.

No histórico do PPGTG, foram encontradas 04 dissertações que guardam afinidade com o tema deste trabalho. Na Tabela 1 a seguir, estão destacados os trabalhos considerados de contexto mais próximo ao desta dissertação.

Tabela 1 – Dissertações com aderência ao tema proposto

Ano	Autor	Orientador	Tema
2018	Thaiane Pinheiro Cabral	Oswaldo A. de C. Junior, Dr.	TOMADA DE DECISÃO DE INVESTIMENTO PRIVADO EM UM NOVO TERMINAL PORTUÁRIO: ANÁLISE COMPARATIVA DAS MODALIDADES ARRENDAMENTO PORTUÁRIO E TERMINAL DE USO PRIVADO
2023	José Carlos Paranhos Souza de Castro	Marcos Aurélio Marques. Noronha, Dr.	A influência das condicionantes geológicas nos custos de escavação de túneis rodoviários
2020	Anderson Moacir Pains	Marcos Aurélio Marques. Noronha, Dr.	ALTERNATIVAS DE ACESSO À BOMBINHAS/SC: ANÁLISE DOS INDICADORES DE DESEMPENHO DA ESCAVAÇÃO DE TÚNEIS E PAVIMENTAÇÃO
2018	Guilherme Arpini Balvedi	Lenise Grando Goldner, Dr(a)	MICROSSIMULAÇÃO DE TRÁFEGO APLICADA NA AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DA SEGURANÇA VIÁRIA EM ROTATÓRIAS: UM ESTUDO DE CASO NA RÓTULA DA UFSC/TRINIDADE

Fonte: Autor (2024)

Pode-se perceber que há trabalhos com temas correlacionados a aspectos que envolvem o tema da presente dissertação, que envolvem avaliação econômica da implantação de túneis rodoviários e que utilizam ferramentas que também serão utilizadas nesta dissertação. No primeiro caso, destaca-se o trabalho de Anderson M. Pains que avaliou os impactos da implantação de um túnel como solução de acessibilidade para a cidade de Bombinhas. Já o trabalho de Guilherme A. Balvedi utilizou recursos de simulação de tráfego para avaliar o desempenho da segurança viária em um estudo de caso em Florianópolis, temas que envolvem o presente estudo.

Observando-se o histórico de trabalhos do PPGTG, nota-se que a presente dissertação traz como contribuição específica um método inovador que pode ser utilizado como base para o aprimoramento de métodos de tomada de decisão. Nesse sentido, esta dissertação pode vir a ser subsídio para novas pesquisas em avaliação de projetos de

infraestrutura rodoviária, além de permitir a análise econômica de forma ex-ante a construção de túneis rodoviários.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O presente capítulo apresentará os principais conceitos que englobam o tema do trabalho. O objetivo deste capítulo é tornar lúcido o conhecimento necessário para a compreensão de todas as definições e etapas realizadas no desenvolvimento do trabalho.

2.1 AVALIAÇÃO SOCIOECONÔMICA

Avaliação socioeconômica, diferentemente da avaliação financeira, procura verificar se um projeto proporciona benefícios líquidos para a sociedade. Também pode ser definida como uma investigação de viabilidade para um determinado projeto além da geração de receitas. Portanto, um projeto pode ser considerado economicamente interessante para a sociedade ainda que não atinja os retornos financeiros desejados pelo investidor ou que não proporcione ganhos monetários para o Estado (CORRÊA et al., 2010).

Para a elaboração de uma análise econômica, muitos pontos devem ser considerados. Entre esses pontos podem ser citados os impactos fiscais, principalmente para obras realizadas com recursos públicos e as externalidades. As externalidades são os impactos causados a terceiros ou que não geram receitas para o projeto como a deterioração de bens próximos a obra. Sobretudo, é importante esclarecer, durante o processo de análise, quais são os *stakeholders* que serão beneficiados e os que não serão atendidos (CORRÊA et al., 2010).

Ao longo dos anos, critérios e ferramentas foram desenvolvidas para a elaboração de avaliações econômicas. Dentre eles, podem ser destacados: análise de custo-benefício (ACB), análise de custo de eficácia e análise multicritério.

2.1.1 Análise de Custo-Benefício

A análise de custo-benefício (ACB), também conhecida como avaliação socioeconômica, é um método que consiste em avaliar e selecionar projetos de infraestrutura. Trata-se de um método prático e quantitativo que mensura os impactos positivos, ponderando os negativos, sob a perspectiva do bem-estar social (BRASIL, 2021).

O critério de análise ACB foi desenvolvido durante a Revolução Industrial, aproximadamente em 1844, pelo francês Arsene Dupuit, aceito como criador da metodologia. Entretanto, apenas durante a década de 50, nos Estados Unidos, passou a ser utilizada de maneira ampla. Desde então, o conceito de análise de custo-benefício passou por muitas atualizações e atualmente é obrigatória em muitos estados americanos como também países europeus (KOCABAŞ; SERKAN KOPURLU, 2010).

Para a execução deste método é necessário quantificar os impactos proporcionados pelo projeto. A maneira mais utilizada, de maneira científica, para promover esse processo, é através da monetização. Este processo também é descrito como o mais difícil durante a execução do método. A monetização deve ser realizada de forma confiável e com o menor teor de subjetividade possível, segundo Califórnia (2015). Para diminuir o teor de subjetividade da análise, recomenda-se a quantificação do maior número de benefícios e custos possível, como também contabilizar externalidades, distorções econômicas e políticas de governo, como afirmam BRASIL (2021) e Corrêa et al., (2010).

A quantificação monetária das externalidades é realizada usualmente a partir de métodos de valoração contingente. Este método tem como objetivo estimar a disposição dos usuários em pagar um valor monetário para obter um determinado item ou serviço, também conhecido como *willingness to pay* (WTP). Geralmente, para se obter o WTP, são realizados questionários a uma parcela representativa da população, em que são apresentados os benefícios e o entrevistado declara o valor disposto a pagar por eles (FERRARI et al., 2020). Quando não há a possibilidade de realizar a quantificação dos benefícios e externalidades, outros métodos de análise econômica são utilizados como o critério de custo-efetividade.

Após finalizada a quantificação dos valores de benefícios e custos, parte-se então para os cálculos dos indicadores econômicos (MIYABUKURO, 2014). Em uma avaliação socioeconômica, os principais indicadores são: Taxa de Retorno Econômica (TER), Valor social Presente Líquido Comparativo ($\Delta VSPL$) e o Índice Benefício-Custo (B/C). Basicamente, o critério de investimento, ou seja, a viabilidade do projeto é positiva se o $\Delta VSPL > 0$ e $TER > TSD$ (Taxa Social de Desconto), segundo BRASIL (2021).

2.1.1.1 Valor Social Presente Líquido

O Valor Social Presente Líquido é a somatória total dos valores de benefícios e custos líquidos descontados à Taxa Social de Desconto. Desta forma, valores de VSPL positivos indicam que os benefícios líquidos são maiores do que os custos para a execução de um projeto (TANGVITOONTHAM e CHAIWAT, 2012). É considerado como o principal e mais confiável indicador de viabilidade econômica em avaliações de projetos (BRASIL, 2021). O VSPL é obtido através da Equação 1:

$$VSPL = \int_{t=0}^T \frac{BL_t - CL_t}{(1 + TSD)^t} + VR_t dt$$

Em que: BL são os benefícios econômicos líquidos obtidos no intervalo de tempo t; CL são os custos líquidos calculados para o intervalo de tempo t; TSD é a Taxa Social de Desconto; VR é o valor residual do projeto.

2.1.1.2 Taxa de Retorno Econômica

De forma simplificada, a Taxa de Retorno Econômica (TER) é aquela em que resulta em um valor de 0 para o VSPL. Também pode ser denominada como o retorno socioeconômico de um projeto. Em uma análise econômica, para um determinado projeto ser viável, a TER deve ser maior do que a Taxa Social de Desconto (TSD). Isto porque a TER pode ser usada como uma ferramenta para medir os esforços na mobilização de recursos públicos para realizar um projeto em comparação aos seus benefícios. Para uma TER menor do que a TSD, fica explícito que recursos valiosos e escassos proporcionam modestos benefícios BRASIL (2021). O valor da TER pode ser obtido dada a solução da Equação 2:

$$0 = \int_{t=0}^T \frac{BL_t - CL_t}{(1 + TRE)^t} + VR_t dt$$

Em que: BL são os benefícios econômicos líquidos obtidos no intervalo de tempo t ; CL são os custos líquidos calculados para o intervalo de tempo t ; TRE é a Taxa de Retorno Econômica; VR é o valor residual do projeto.

2.1.1.3 Taxa Social de Desconto

Devido ao longo período de vida útil de um empreendimento é necessário realizar uma análise econômica através de um intervalo de tempo determinado. Isto ocorre pela desvalorização da moeda ao longo do tempo, principalmente pelos efeitos da inflação. Segundo o Guia de Análise de Custo-Benefício elaborado pelo Conselho de Transporte e Infraestrutura Australiano (2018), existem diferentes formas e abordagens para selecionar a Taxa Social de Desconto. Em obras de infraestrutura na Austrália, a taxa de desconto utilizada real é de 7%, utilizando uma variação em média de 3% para realizar testes de sensibilidade.

No Brasil, a Taxa Social de Desconto (TSD) é utilizada como base para mensurar a percepção da sociedade em relação ao custo de oportunidade social. Para a determinação de um valor para a TSD, foi realizada uma média ponderada entre os diferentes tipos de fontes de recursos. Como base, a TSD é calculada a partir da taxa de juros básica (SELIC), embora o resultado seja obtido quando levado em consideração influência de mercado de capitais, principalmente tributárias. De forma geral, segundo o Guia Geral de Análise Socioeconômica de Custo-Benefício de Projetos de Investimento em Infraestrutura (Brasil, 2021), a TSD real recomendada é de 8.5% ao ano.

2.1.1.4 Índice Benefício-Custo

O Índice Benefício-Custo, como o próprio nome sugere, é a relação matemática entre os benefícios líquidos calculados de um projeto e o seu custo. Este índice tem como objetivo apoiar os resultados obtidos pelo VPL, o que permite reduzir possíveis flutuações do valor presente devido a sensibilidade da taxa de desconto utilizada. Ademais, o Índice Benefício-Custo também tem o potencial de determinar a efetividade de um projeto, quanto maior for a relação entre benefício-custo, maior será a viabilidade do empreendimento. O valor do índice B/C pode ser obtido através da Equação 3:

$$\frac{B}{C} = \frac{\sum_{t=0}^T \frac{BL_t}{(1 + TSD)^t}}{\sum_{t=0}^T \frac{CL_t}{(1 + TSD)^t}}$$

Em que: BL são os benefícios econômicos líquidos obtidos no intervalo de tempo t; CL são os custos líquidos calculados para o intervalo de tempo t; TSD é a Taxa Social de Desconto.

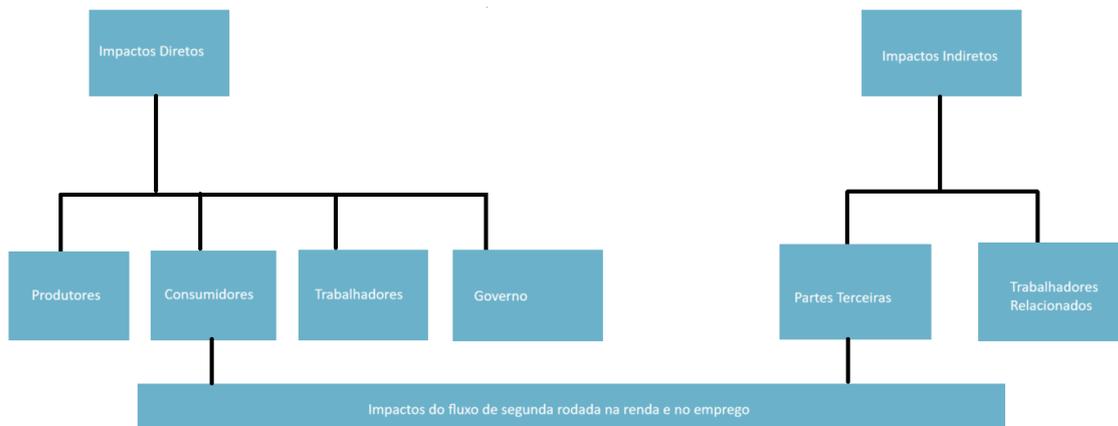
2.1.2 Benefícios

De maneira geral, os benefícios podem ser definidos como efeitos positivos de um determinado projeto. Do ponto de vista de uma análise financeira, o benefício para o empreendedor é o lucro monetário em um fluxo de caixa. Já pela perspectiva da análise socioeconômica, além da parte monetizável ou monetária, também são levados em consideração os excedentes sociais, que podem ser categorizados como efeitos positivos diretos, indiretos ou externalidades (BRASIL 2021).

A estimativa dos benefícios é considerada como um dos maiores desafios durante a elaboração de uma Análise de Custo-Benefício (BRASIL 2021). Isto porque realizar a monetização de benefícios, especialmente os indiretos, de forma fácil ou confiável, é complexo. Ao analisar em longo prazo (ciclo de vida) os benefícios, diretos ou indiretos, proporcionados por obras subterrâneas, podem compensar os custos iniciais maiores do que em comparação a instalações superficiais (CALIFÓRNIA, 2015).

Para facilitar a análise e descrição dos benefícios de um projeto, é possível separá-los em impactos diretos e indiretos. Além disso, é de suma importância também identificar os *stakeholders* para cada um desses benefícios. A Figura 2 demonstra um fluxograma no qual apresenta uma maneira de realizar essa análise.

Figura 2 - Fluxograma para análise dos benefícios.



Fonte: Adaptado de NSW Government (2017)

Os benefícios diretos podem ser definidos como aqueles que causam impactos relevantes para os *stakeholders* primários, principalmente para produtores e consumidores de serviços que estejam associados à proposta de projeto. Para facilitar a compreensão desse conceito, um exemplo de benefício direto para os consumidores seria a redução do tempo de viagem ao utilizar uma nova obra de infraestrutura.

Ao analisar os benefícios indiretos, esses podem ser definidos como aqueles que causam impactos a partes terceiras, que não estão envolvidas no consumo ou produção primária de bens e serviços. Para exemplificar, pode ser citado uma possível redução na taxa de criminalidade em uma determinada região devido ao investimento em projetos de educação (AUSTRÁLIA, 2017). A Figura 3 mostra um quadro na qual são mostrados exemplos de benefícios diretos e indiretos.

Figura 3 – Quadro de exemplos de benefícios

	Transporte Rodoviário		Educação	
	Custos	Benefícios	Custos	Benefícios
Impactos Diretos	Custos de manutenção Custos de implantação	Redução do tempo de viagem, redução dos custos operacionais de veículos Redução de sinistros	Custos governamentais para fornecer educação Custos dos estudantes	Benefícios para os estudantes: ganhos e produtividade
Impactos Indiretos	Poluição do ar Poluição sonora	Redução do tempo de viagem, redução dos custos operacionais de veículos Redução de sinistros em outras vias	Deslocamento de profissionais	Benefícios para os empregadores Redução da criminalidade e outros problemas sociais

Fonte: Adaptado de Austrália (2017)

Entretanto, a descrição dos benefícios realizada pela Ministério da Economia, em seu Guia de Geral de Análise Socioeconômica (Brasil, 2021), demonstra que os impactos indiretos são classificados como externalidades. Não há uma definição clara sobre como os impactos indiretos devem ser contabilizados. Ademais, na elaboração do Guia de Custo-Benefício pelo Governo de Nova Gales do Sul (estado australiano), as externalidades são classificadas de maneira separada dos impactos indiretos. As externalidades são definidas, segundo o Governo de Nova Gales do Sul, como o resultado do consumo de certos tipos de bens e serviços que causam impactos (positivos e negativos) a terceiros não relacionados diretamente. Um exemplo de externalidade positiva seria a utilização de uma vacina que, além de proteger o indivíduo que a utiliza (*stakeholder* primário), também acarreta o efeito positivo na redução da proliferação de uma doença.

Outro fator importante para a análise de benefícios de um empreendimento é diferenciar os impactos de “primeira rodada” ou primeira ordem com os de segunda. Os efeitos de segunda ordem não devem ser contabilizados nos cálculos e incluídos em uma ACB. Os efeitos de segunda ordem podem ser descritos como a utilização dos benefícios obtidos em um empreendimento em outro projeto (AUSTRÁLIA, 2017).

O processo de monetizar os benefícios estipulados para um empreendimento pode ser realizado de diversas formas. A mais comum trata-se em estimar o DAP (Disposição a Pagar) a partir de métodos empíricos, como preferência declarada, preferência revelada ou transferência de benefícios. Entretanto, o fator mais importante é que os benefícios devem ser calculados amparados pela comparação entre o cenário base e o alternativo (BRASIL, 2021).

2.1.3 Custos

A etapa de estimação de custos em uma análise de custo-benefício é a primeira a ser realizada. Nesta parte, todos os custos envolvidos no ciclo de vida de uma obra devem ser levados em consideração. Geralmente este processo é elaborado com a segmentação dos custos em dois grandes grupos chamados *Capex* (despesas de capital) e *Opex* (despesas de operação) (BRASIL, 2021).

O Planejamento de Avaliação de Transporte Australiano (Austrália, 2018) sugere que a estimativa de custos seja feita para cada ano do horizonte de análise. Para ACB detalhados, é enfatizado que seja fornecido um orçamento que fique claro os itens e quantidades de insumos e seus custos unitários. Ademais, para análises “rápidas”, é permitido erros de aproximadamente 40% do valor real, e 10% para análises detalhadas. Outro fator importante que deve ser evitado em uma estimativa de custos é a manipulação do valor real através de viés de otimismo pelos autores, que podem não considerar fatores relevantes e que reduzem os custos de investimentos para melhorar os resultados encontrados.

2.1.3.1 Custos de Investimento (*Capex*)

A primeira etapa para a elaboração de uma estimativa de custos trata-se em analisar os custos totais de investimento (*Capex*). Usualmente, são classificados como investimento inicial e custos de substituição (reposição) (EUROPEAN COMMISSION, 2014).

O *Capex* de investimento inicial deve englobar todos os custos de capital realizados para todos os ativos fixos e não fixos. Isto é, são levados em consideração, por exemplo, valores aplicados em terreno e equipamentos (fixos), como também em obtenção de licenças, estudos de engenharia, supervisão da construção (não-fixos).

Em relação aos custos de reposição, devem ser incluídos aqueles valores que são aplicados durante o horizonte de análise em substituição de equipamentos e ou maquinários que se desgastam ao longo do ciclo de vida do empreendimento. Também devem ser levados em consideração os valores aplicados na manutenção da obra. Ademais, é usual que valores expressivos ocorridos ao final do horizonte de análise não sejam incluídos no fluxo de caixa. Neste caso, é possível modificar o período de referência da ACB, ou então, realizar a

simplificação do custo de manutenção através de um aumento anual proporcional (BRASIL, 2021).

2.1.3.2 Custos de Operação (*Opex*)

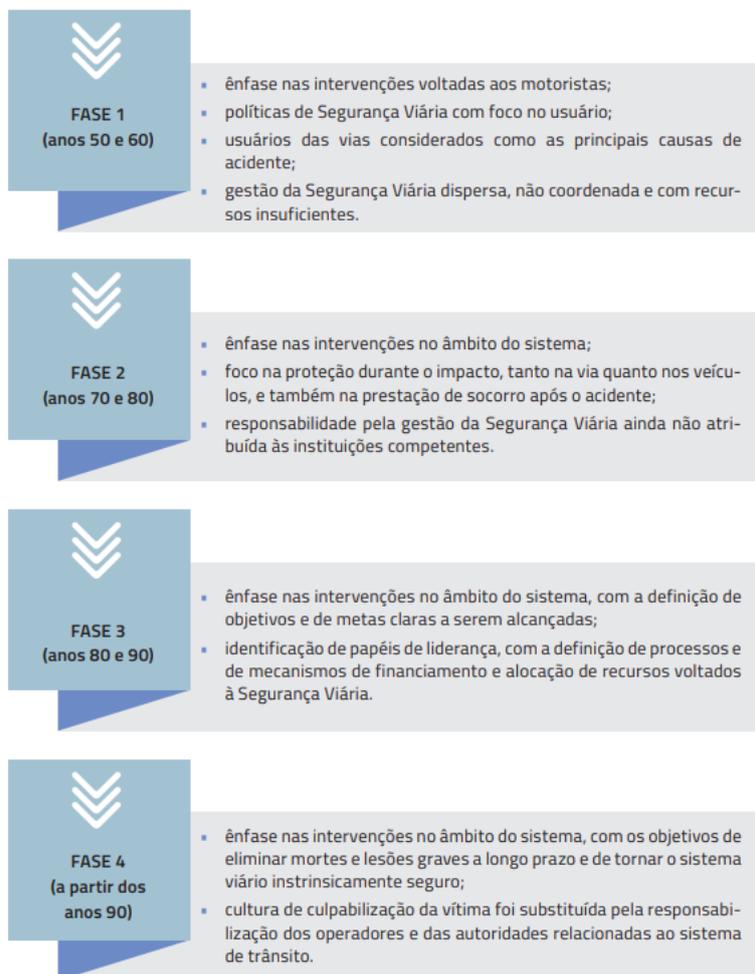
Os custos de operação são aqueles que incluem todos os custos operacionais e de manutenção. Geralmente esses valores podem ser estimados a partir da estipulação de custos unitários padronizados através de um plano de manutenção preventivo sistemático baseado no cronograma de gerenciamento. Usualmente, os fatores levados em consideração na concepção do *Opex* são os custos devidos aos materiais necessários para manutenção e reparo de ativos, consumo de matérias-primas, energia, entre outros (EUROPEAN COMMISSION, 2014).

2.2 SEGURANÇA VIÁRIA

A Segurança Viária é uma área de estudo pertencente à Engenharia de Tráfego. Ela pode ser definida como a ausência total de sinistros e de lesões no trânsito. Trata-se de uma situação em que o risco ao usuário é praticamente nulo. Para atingir esse objetivo, é necessária a análise minuciosa de diversos elementos em diferentes áreas de atuação. Essas áreas de atuação vão desde a concepção de projeto, qualidade de construção, frequência e fiscalização de manutenção, até a disseminação de conhecimento técnico através da educação de trânsito (SÃO PAULO, 2023).

A abordagem da Segurança Viária evoluiu com o passar do tempo. Inicialmente, o foco dos estudos e análises era voltado para promover a conscientização dos usuários, através de campanhas publicitárias, fiscalização e educação, com o objetivo de proporcionar o respeito às regras de trânsito. Com o passar dos anos, as áreas de atuação foram ampliadas e a ênfase dos estudos e intervenções foram mudando de foco, conforme demonstra a Figura 4.

Figura 4 – Mudanças de abordagem da Segurança Viária



Fonte: São Paulo (2023)

Barreto (2015) apresentou os principais fatores contribuintes para a ocorrência de sinistros viários, que foram destacados em três grupos básicos, e que frequentemente podem se correlacionar:

- I. Fator humano;
- II. Fator mecânico (veicular); e
- III. Fator viário-ambiental.

Machado *et al.* (2022) elaboraram um estudo para verificar a possível existência da correlação entre os sinistros viários causados pela falta de atenção dos condutores e as características do meio físico. Através de uma análise de *Hot Spots*, realizada por meio de uma análise estatística espacial, os autores identificaram que a localização da maioria dos sinistros com alta severidade possuíam localização geográfica próxima um dos outros. Desta

forma, os autores concluíram que determinadas características físicas dos locais, onde ocorreram os sinistros, podem contribuir para a sua ocorrência.

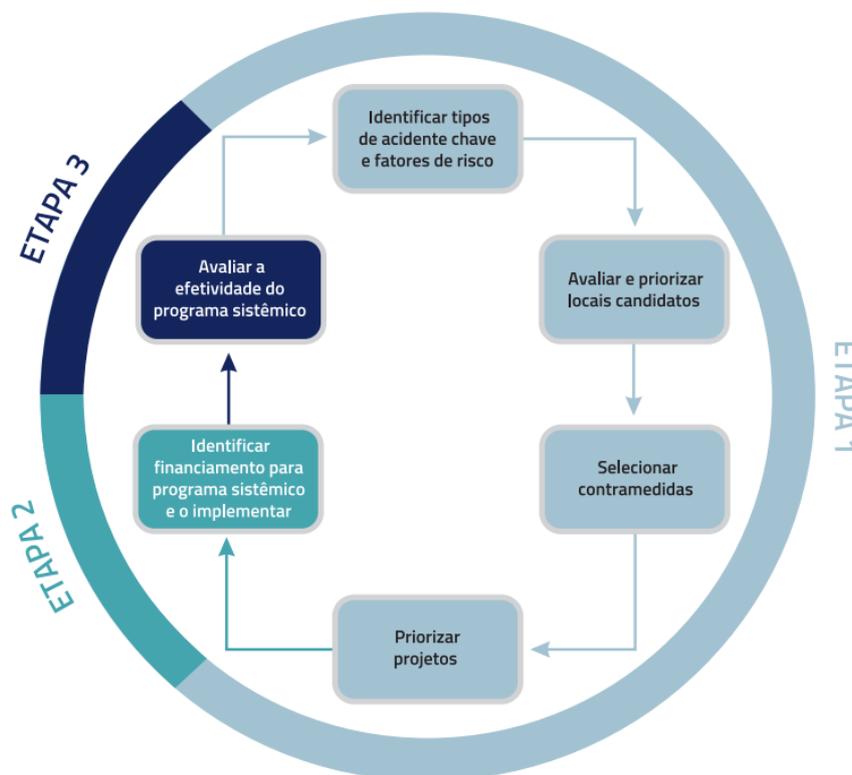
2.2.1 Métodos de avaliação

Os métodos tradicionais de avaliação e de gerenciamento da Segurança Viária geralmente podem ser subdivididos em duas abordagens: reativa ou proativa. A primeira abordagem é desenvolvida a partir de dados históricos de sinistros, com o objetivo de identificar os locais com maior risco aos usuários através dos pontos críticos (*Hot Spots*). Desta forma, os locais são priorizados e detalhados para o desenvolvimento de um programa de tratamento. A segunda abordagem, em contrapartida, possui o objetivo de identificar os locais com maior risco de sinistro aos usuários, sem a necessidade da ocorrência de sinistros. Geralmente, a abordagem proativa é elaborada a partir de Auditorias de Segurança Viária (ASV), que busca analisar projetos de novas rodovias como para projetos de modernização e reabilitação. Atualmente, a abordagem proativa utiliza métodos como, Técnica de análise de Conflitos de Tráfego (TCT) e a metodologia iRAP para rodovias em operação (SÃO PAULO, 2023).

Pianezzar (2019) elaborou um estudo no qual realiza uma análise comparativa de diversas metodologias de identificação de segmentos críticos, especificamente para rodovias rurais. O autor utilizou em seu estudo, tanto métodos reativos quanto proativos. Como resultado, foi apresentada a baixa correlação estatística entre os métodos, possivelmente devido a abrangência maior de pontos com maior risco detectados pela metodologia iRAP.

Atualmente, encontram-se na literatura evidências de que os sinistros ocorridos em vias rurais, principalmente aqueles de alta severidade, apresentam a característica de estarem dispersos e distribuídos ao longo da malha. Desta forma, existe a possibilidade de os métodos tradicionais, reativos e proativos, não conseguirem detectar os locais de alto risco. Para tentar contornar este problema, foi desenvolvida a abordagem sistêmica. Esta nova abordagem tem como característica a combinação dos dois métodos tradicionais de avaliação (FHWA, 2013). A Figura 5 apresenta as etapas de uma análise sistêmica.

Figura 5 – Etapas da abordagem sistêmica

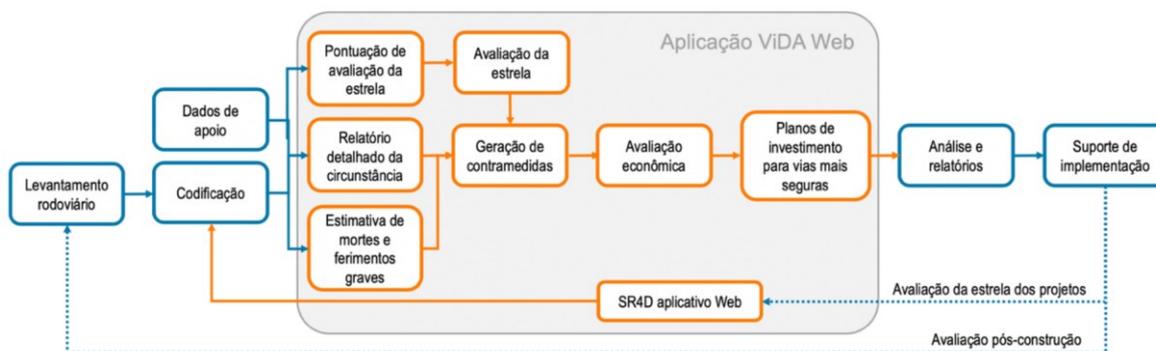


Fonte: São Paulo (2023)

2.2.2 Metodologia iRAP

O iRAP (*International Road Assessment Programme*) trata-se de uma metodologia internacional de gerenciamento de Segurança Viária caracterizada pela abordagem proativa. Ela exerce a função de analisar a infraestrutura viária, mais especificamente sobre os elementos que compõem os sistemas de segurança. A metodologia foi elaborada através dos resultados apresentados pelos programas de gestão e avaliação viária de diversos países, composta, inicialmente, pelo EuroRAP (Programa de Avaliação Rodoviária Europeia). A partir dos estudos elaborados pelos programas de avaliação rodoviária (EuroRAP, AusRAP, usRAP e KiwiRAP), foram desenvolvidos os protocolos de maneira padronizadas, e assim disponibilizados internacionalmente. Os protocolos tratam sobre o Mapa de Risco, a Classificação por Estrelas, o Plano de Investimento para Vias mais Seguras e o Acompanhamento do Desempenho (iRAP 2013a, 2014a). As etapas para a execução da metodologia iRAP estão apresentadas pela Figura 6.

Figura 6 – Etapas da metodologia iRAP



Fonte: iRAP (2022)

Entre os protocolos citados, a Classificação por Estrelas e o Plano de Investimento para Vias mais Seguras podem ser utilizados de forma sistemática. A Classificação por Estrelas é definida como a somatória da pontuação de risco relativo a sinistros de trânsito com vítimas fatais e gravemente feridas. A classificação é calculada para cada 100 metros da via analisada e para cada tipo de usuário (iRAP, 2014b). O resultado dessa somatória gera a pontuação total de risco SRS (*Star Rating Score*). Através dessas pontuações foram criados níveis de Classificação por Estrelas, os quais identificam o nível de risco para cada tipo de usuário, variando de 1 a 5 estrelas. As vias classificadas com 1 estrela apresentam maiores riscos aos seus usuários, enquanto as classificadas com 5 estrelas proporcionam riscos menores (iRAP, 2013b). A

Figura 7 apresenta os níveis da Classificação por Estrelas e suas respectivas pontuações de risco para cada tipo de usuário da via.

Figura 7 – Níveis da Classificação por Estrelas por Usuário da Via

Classificação por Estrelas	Pontuação da Classificação por Estrelas				
	Ocupantes de veículos e motociclistas	Ciclistas	Pedestres		
			Total	Ao longo da via	Atravessando
5	0 a < 2,5	0 a < 5	0 a < 5	0 a < 0,2	0 a < 4,8
4	2,5 a < 5	5 a < 10	5 a < 15	0,2 a < 1	4,8 a < 14
3	5 a < 12,5	10 a < 30	15 a < 40	1 a < 7,5	14 a < 32,5
2	12,5 a < 22,5	30 a < 60	40 a < 90	7,5 a < 15	32,5 a < 75
1	22,5 ou +	60 ou +	90 ou +	15 ou +	75 ou +

Fonte: iRAP (2013b)

A metodologia iRAP foi aplicada em Florianópolis por Santos (2022). A autora realizou uma análise da segurança viária para a rodovia estadual SC-401. O principal objetivo do estudo foi identificar os principais segmentos críticos, a partir da pontuação de risco (SRS). Como resultado, foi apresentada a classificação por estrelas para a rodovia para cada tipo de usuário e uma análise da infraestrutura nos trechos que apresentaram as maiores pontuações de risco (SRS).

2.3 ESTUDOS DE TRÁFEGO

Estudos de tráfego podem ser definidos como um conjunto de técnicas e métodos sistemáticos, realizados através da coleta de dados, que possuem o objetivo de obter informações sobre os cinco elementos fundamentais de tráfego: motorista, pedestre, veículo, via e meio ambiente. Certamente, os estudos de tráfego também possuem o objetivo de avaliar o inter-relacionamento destes elementos (BRASIL, 2006a).

Os estudos de tráfego podem ser considerados como um instrumento pertencente a Engenharia de Tráfego, que serve de parâmetro para compreender melhor a circulação do trânsito para a área de interesse. Desta forma, estes estudos podem ser utilizados para realizar um planejamento adequado para a elaboração de projetos de ampliação e criação de novos percursos, com o objetivo de atender as necessidades dos usuários de maneira eficiente e econômica (BRASIL, 2006a).

2.3.1 Termos e Definições

Para compreender melhor os instrumentos que serão utilizados no desenvolvimento do presente trabalho, serão apresentados a seguir as definições de alguns dos principais termos usados nos estudos de tráfego. As definições foram elaboradas a partir de Brasil (2006a) e São Paulo (2006).

2.3.1.1 Capacidade

A capacidade tem por objetivo expressar o número máximo de veículos suposto que podem passar por determinado trecho. Este trecho pode ser de apenas uma faixa ou de toda a pista de rodagem. O valor da capacidade deve ser estipulado para um valor de período determinado, sob os parâmetros e condicionantes reais definidos para a via e para o tráfego (BRASIL, 2006a).

2.3.1.2 Tempo de Viagem

O tempo de viagem pode ser definido como aquele período necessário para que um veículo percorra um determinado trecho da via. No tempo de viagem devem ser levados em consideração os tempos de parada (BRASIL, 2006a).

2.3.1.3 Velocidade Média de Viagem

A velocidade média de viagem é definida como aquela realizada por um veículo em um trecho de via definido, determinada pela razão entre o comprimento total do trecho pelo tempo médio gasto para percorrê-lo. Devem ser incluídos os tempos em que o veículo possivelmente esteja parado (BRASIL, 2006a).

2.3.1.4 Volume Médio Diário (VMD)

O volume médio diário é compreendido como o número total de veículos que passam por uma seção, de via ou faixa, por dia. O VMD pode apresentar variações sobre o período analisado, que pode ser semanal, mensal ou anual (SÃO PAULO, 2006).

2.3.1.5 Nível de Serviço

O nível de serviço pode ser definido como uma medida qualitativa que busca identificar a capacidade e qualidade que uma via possui. Essa medida qualitativa reflete, em muitos casos, o nível de conforto e conveniência para os usuários. Entre os fatores que definem o nível de serviço podem ser citados: velocidade e tempo de viagem; segurança; custos operacionais; interrupções do tráfego; entre outros (SÃO PAULO, 2006).

2.3.1.6 Fator Horário de Pico (FHP)

O fator horário de pico é definido como um fator que representa a intensidade do volume máximo de quinze minutos dentro da hora de pico. O fator é obtido através da divisão entre o volume total da hora de pico dividido pelo quádruplo do volume do período de quinze minutos da hora de pico com o maior fluxo de tráfego. Desta forma, quanto maior é o valor do FHP, mais estável é o tráfego durante a hora de pico (BRASIL, 2006a).

2.3.1.7 Volume Horário de Projeto (VHP)

O volume horário de projeto é aquele obtido através do resultado final do estudo de tráfego. Ele deve ser utilizado para o dimensionamento de faixas de tráfego da via, tempo de viagem, entre outros. Este volume deve atender as condições adequadas de segurança e conforto aos usuários (SÃO PAULO, 2006).

2.3.2 Coleta de Dados

A atividade de coleta de dados faz parte da pesquisa de tráfego. Ela deve ser planejada e executada conforme os parâmetros e objetivos do projeto. Geralmente, os procedimentos são realizados através de entrevistas com os usuários ou por observação direta. O método realizado por entrevista consta em obter informações sobre o comportamento do usuário através de perguntas ou formulários escritos. Pelo método de observação direta, a análise do comportamento é feita através de registros dos fenômenos.

Além disso, a observação direta possui a vantagem de não perturbar o fluxo do trânsito, o que proporciona uma análise mais realista do tráfego na região de análise (BRASIL, 2006a).

As pesquisas de tráfego geralmente podem ser subdivididas em dois tipos, contagens volumétricas e análise de origem e destino. Informações adicionais podem compor as pesquisas como, por exemplo, classificação dos tipos de veículos, análise da velocidade, pesagem de veículos, entre outros. A seleção do tipo de pesquisa e os dados a serem coletados dependerá do tipo de estudo de tráfego a ser elaborado e do tipo de projeto em execução. Para projetos mais complexos e em estágios mais avançados de detalhamento, as pesquisas de origem e destino são mais recomendadas. Para estudos preliminares e análises de viabilidade, o principal objetivo é determinar o volume e o tipo de tráfego atual e futuro para o projeto (SANTA CATARINA, 1998; BRASIL, 2006a).

As contagens volumétricas possuem o objetivo de determinar o volume, a classificação e o sentido do fluxo de veículos que passam por um determinado ponto de interesse. As contagens volumétricas podem ser classificadas como: globais, direcionais e classificatórias. Os métodos disponíveis para realizar as contagens são diversos, desde meios mais simples como a contagem manual, até postos de contagem automática. O volume de tráfego também pode ser obtido através de filmagens com câmeras de vídeo. Também é possível obter esses dados a partir de registros elaborados em praças de pedágio, anuários estatísticos e Plano Diretor (SÃO PAULO, 2006). Para determinar os valores de volume de tráfego futuro, são necessários cálculos para determinar os fatores de expansão e crescimento.

2.3.3 Fatores de Expansão

A realização de uma pesquisa de tráfego demanda alto teor de recursos financeiros e humanos. Desta forma, a obtenção de valores de volume de tráfego para todos os dias e horas durante um ano é praticamente inviável. Para contornar este problema, existem artifícios matemáticos que auxiliam a determinar os valores de VMD anual de maneira indireta.

Os artifícios matemáticos utilizados para determinar o VMD anual são chamados de fatores de sazonalidade ou fatores de expansão. Esses fatores são capazes de ajustar as oscilações que podem ocorrer entre os períodos de contagem. Usualmente as correções são

elaboradas em sequência, dependendo do planejamento de contagem executado. Primeiramente, é realizada a adequação para as variações horárias dentro do período de um dia, depois para oscilações diárias no período de uma semana, e por fim os ajustes mensais para um período de um ano (BRASIL, 2006a; SÃO PAULO, 2006; SANTA CATARINA, 1998). Caso a contagem for elaborada a partir de amostras horárias, é possível aplicar todos os fatores em uma única equação, conforme apresentado pela Equação 4:

$$VMDa = \frac{T_c}{F_d} \times \frac{F_h}{F_m}$$

Em que: VMDa é o volume médio diário anual; Fh é o fator horário, para a expansão dos volumes contados e referidos para 24 horas; Fd é o fator diário, para ajustar as oscilações diárias no período de uma semana; e Fm é o fator mensal para ajustar as oscilações de carga de tráfego para o período de um ano.

A utilização desses fatores de expansão pode gerar erros de precisão na contagem final do volume. De modo geral, a precisão do volume de tráfego obtido depende do número de observações. Usualmente, o nível de confiança de uma contagem é proporcional à raiz quadrada do número de observações. Além disso, rodovias que apresentam volume de tráfego maior geralmente possuem flutuações menores (BRASIL, 2006a). A Tabela 2 apresenta uma aproximação dos níveis de precisão para diferentes métodos de contagem manual.

Tabela 2 – Estimativa de precisão para contagem manual

I – Usando Contadores Manuais			
Método	Nível de Precisão	Variações aceitáveis	Observações
(1) - Contagem durante 1 hora, em um dia de semana, entre 9 a.m. e 6 p.m.	D	A contagem pode ser estendida	
(2) - Contagem em um dia de semana, de 6 a.m. até 10 p.m.	C ou D		
(3) - Contagem entre 6 a.m. e 10 p.m. de 5ª Feira até Domingo	C	Pode ser estendida para dias incluindo 2ª Feira	Para a semana use 5 x 5ª + Sábado + Domingo
(4) - Contagem entre 6 a.m. e 10 p.m. em 7 dias consecutivos	C		
(5) - Métodos (1) a (4) em 4 vezes (6) - em intervalos de 3 meses (7) - (usando para (1) e (2) diferentes horas (8) - e dias)	C C B B	O número de vezes pode ser 2,3 ou 6 em vez de 4, alterando de forma semelhante o espaçamento	Calcule os totais de cada semana e então a média das 4 semanas
(9) - Contagem das 6 am às 10 pm de 52 em 52 dias durante 1 ano (7 contagens)	B		Estes métodos são de grande utilidade quando se tem que contar em vários pontos de uma mesma área. Podem ser feitas variações para atender a condições especiais
(10) - Contagem das 6 am às 10 pm de 26 em 26 dias durante 1 ano (14 contagens)	A ou B		
(11) - Contagem das 6 am às 10 pm de 13 em 13 dias durante 1 ano (28 contagens)	A		
(12) - Como em (9), mas divida o trecho do dia de interesse em 7 partes iguais (p. ex 2 horas. Em cada uma das 7 contagens conte uma parte, na ordem 1,4,7,3,6,2,5	C	Pode variar a parte em que inicia a contagem, mantendo a ordem, como 4,7,3,6,6,5,1, ou 3,6,2,5,1,4,7	
(13) - Como em (10) mas divida o trecho do dia de interesse em 14 partes iguais (por ex. 14 partes de 1 hora) e conte sucessivamente as partes 1,4,7,10,13,2,5,8,11,14,3,6,9,12	C		
(14) - Como em (11) divida o trecho do dia de interesse em 14 partes iguais e conte sucessivamente as partes 1,6,11,2,7,12,3,8,13,4,9,14, e então repita este ciclo	B		

Fonte: Brasil (2006a)

Além dos fatores de sazonalidade, é importante elaborar as estimativas de volume futuro. Para determinar esses valores, é necessário acrescentar um fator de crescimento. Esse fator de crescimento pode ser baseado em estudos socioeconômicos que demonstram o crescimento populacional para a área de interesse. Outros índices podem contribuir para determinar o fator de crescimento, como a taxa de aumento da frota de veículos e emplacements para a região.

2.4 IMPACTOS AMBIENTAIS

A elaboração de análises de impactos ambientais durante o desenvolvimento de projetos de transportes apresenta grande complexidade. Os pontos a serem identificados e apurados são extensos. O nível de detalhamento das análises vai ao encontro do estágio de aprofundamento do projeto. Usualmente, as etapas de desenvolvimento de estudos ambientais são: Relatório Preliminar de Avaliação Ambiental (RPAA); Estudo de Impacto Ambiental (EIA); Relatório de Impacto Ambiental (RIMA); Plano Básico Ambiental (PBA). Após a finalização dos planos e início da execução da obra, é elaborado um *As Built* Ambiental, que contempla relatórios sobre a implementação dos programas ambientais. Para a fase de operação da obra, deve ser efetivado o Monitoramento Ambiental (BRASIL, 2006b). A Figura 8 apresenta o fluxograma de ações para a elaboração de estudos ambientais para projetos rodoviários.

Figura 8 – Fluxograma de estudos ambientais



Fonte: Brasil (2006b)

O Relatório Preliminar de Avaliação Ambiental pode ser definido como um documento composto embasado na coleta e análises de dados secundários, muitas vezes aliada a inspeções *in loco*. Tem por objetivo apresentar informações sobre a caracterização ambiental da área de interesse. Dessa forma tende a orientar decisões de projetos que serão tomados em etapas seguintes. Trata-se de um documento facultativo, não é exigido como obrigatório por Órgãos Ambientais.

O Estudo de Impacto Ambiental tem como objetivo identificar as possíveis consequências ambientais que a implantação do projeto pode causar. Essa análise deve ser

elaborada por uma equipe multidisciplinar. Além disso, o EIA também deve apresentar um prognóstico da situação atual da área de interesse anterior a implantação do projeto.

O Relatório de Impacto Ambiental apresenta as informações técnicas identificadas e avaliadas no EIA, mas de maneira sucinta e com uma linguagem mais acessível para a população. Geralmente neste relatório, são apresentados gráficos e imagens que simplifiquem os resultados do EIA, comparando as vantagens e as desvantagens da implantação do projeto, para que assim seja facilmente compreendido pela comunidade envolvida.

O Plano Básico Ambiental é o relatório mais completo e com a idealização mais prática, descrevendo os Programas Ambientais que apresentam vínculo com o tipo de projeto a ser implantado. Todos esses programas devem ser detalhados conforme o nível de projeto (básico ou executivo).

Para as etapas de execução e operação devem ser realizados os relatórios de implantação e monitoramento ambiental, respectivamente. O relatório de implementação deve apresentar todos os Programas Ambientais que apresentam vínculo com a etapa de execução da obra. O monitoramento ambiental tem por objetivo avaliar, durante a operação do projeto implantado, o estabelecimento dos Programas Ambientais elaborados durante a fase de projeto. Eventualmente, pode ser solicitada a adoção de medidas ambientais complementares, corretivas ou mitigadoras, adicionais ou complementares. A lista de todos os Programas Ambientais que podem ser exigidos conforme o tipo de projeto pode ser encontrado em Brasil (2006b).

No Brasil não se encontram materiais oficiais sobre a análise de impactos ambientais específicos para túneis. Além disso, não há uma padronização para a realização da valoração dos impactos ambientais. Os possíveis impactos ambientais para túneis são tema de discussão na literatura internacional, inclusive com a discordância entre diversos pesquisadores, principalmente sobre a gravidade e as áreas mais afetadas. Além disso, em comparação com outras Obras de Arte Especiais, ocorre a possibilidade de os túneis apresentarem impactos ambientais reduzidos. Outro ponto interessante de discussão é a capacidade que os benefícios socioambientais de obras subterrâneas apresentam e que podem compensar os outros impactos ambientais negativos (ITA, 2016; Tender *et al.*, 2017; Namin *et al.*, 2014).

Para efeitos de cálculo, o presente estudo tomará como referência os valores estipulados pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) em seu Custos Médios Gerenciais (Brasil, 2011). No documento, é proposta a utilização de uma taxa de 5,25% do valor total do projeto ao ano para a realização de estudos ambientais e seus planos de Programa Ambiental.

2.5 TÚNEIS

De maneira geral, túneis são estruturas utilizadas para atravessar locais que apresentam perfil geológico complexo. São reconhecidas como Obras de Arte Especiais que apresentam o objetivo de aprimorar o transporte, tornando-o mais eficiente e cômodo aos usuários.

Em comparação à maioria dos projetos de engenharia, os túneis apresentam alta complexidade devido principalmente à imprevisibilidade das formações geológicas. O desenvolvimento e execução de um projeto de túnel torna-se ainda mais intrigante ao levar em consideração que a maior parte do sistema estrutural se trata do próprio perfil geológico.

Conforme afirmado por Chapman, Metje e Stärk (2010), nenhum túnel é igual a outro. Cada um possui suas próprias características. Desta maneira é imprescindível que análises contínuas do solo sejam elaboradas. A partir dos relatórios geológicos obtidos através de diversas técnicas de exploração, devem ser tomados os devidos julgamentos técnicos de engenharia.

2.5.1 Breve Histórico

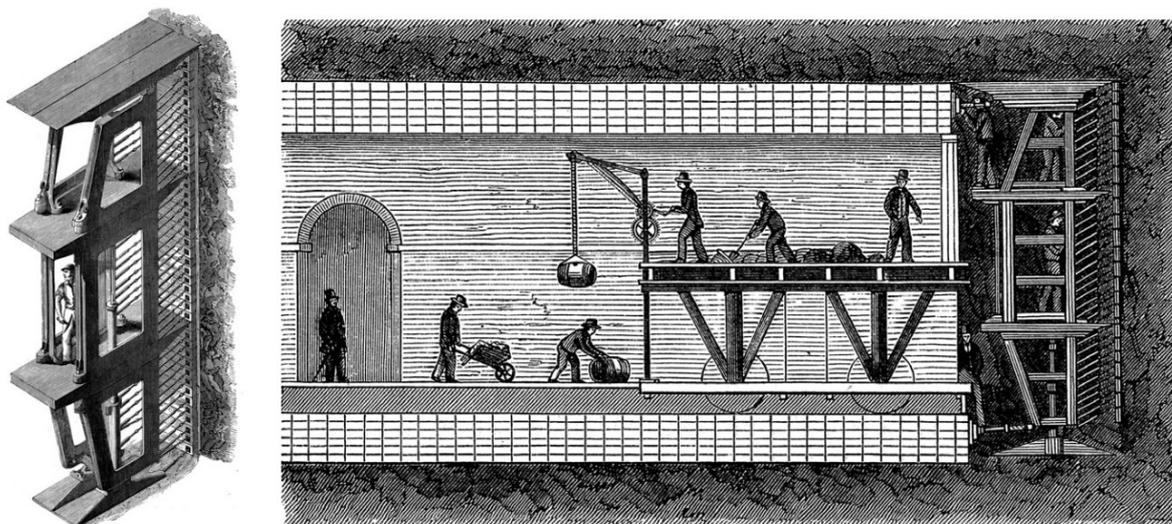
Os primeiros vestígios de experiências geotécnicas reconhecidos por paleontólogos são de utensílios elaborados durante a Pré-História pelo *Homo Faber*, através do conhecimento acerca da dureza distinta entre os tipos de rocha e os seus planos de falhas. Com o passar do tempo, novas motivações, principalmente relacionadas ao setor da agricultura, fizeram com que os povos antigos desenvolvessem técnicas de irrigação e drenagem através de escavações. Os Persas, por exemplo, escavaram túneis conhecidos como *qanats*, que exploravam as nascentes de água em sopé de cadeias montanhosas. Desta forma, mantinham o frescor da água e reduziam as perdas pela evaporação. Os gregos e

romanos também desenvolveram técnicas de engenharia para a construção de túneis, com a criação de sistemas de abastecimento de água e esgoto. Um exemplo desses sistemas trata-se da *Cloaca Massima*, existente até os dias atuais, que era utilizada como sistema de transporte de efluentes (MOREIRA, 2006).

Com o passar dos séculos, as técnicas de escavação foram evoluindo e começaram a ser utilizadas para o desenvolvimento do transporte de cargas e passageiros e de minas carboníferas. As primeiras escavações de grande porte foram elaboradas para criar a conexão de entre rios e oceanos através de canais. Esse desenvolvimento foi gerado principalmente pela demanda ocasionada pela queda do Império Romano (WOOD, 2000). A partir do século XVII, as técnicas de escavação foram aprimoradas. A aplicação de sistemas de contenção por vigas e escoras de madeira foi desenvolvida principalmente em minas de sal e carvão. A partir de então, novos sistemas de escavação foram criados o Sistema Alemão, Belga, Inglês e Austríaco (WOOD, 2000).

Os avanços tecnológicos ocorridos através da Revolução Industrial, proporcionaram a utilização de túneis para garantir o escoamento da matéria prima de maneira mais rápida e eficiente através do transporte ferroviário. O número de túneis ferroviários construídos durante o século XIX foi aumentado exponencialmente, principalmente no Reino Unido. Durante este período novas técnicas de escavação e contenção foram criadas, como o *Brunel's Shield*, que proporcionava maior segurança aos colaboradores durante a execução do túnel (CHAPMAN; METJE; STARK, 2010). A Figura 9 demonstra o funcionamento do *Brunel's Shield*.

Figura 9 – Ilustração do funcionamento do *Brunel's Shield*.



Fonte: Chapman, Metje e Stark (2010)

No continente americano, os primeiros túneis foram escavados durante o século XVIII, principalmente voltados à mineração. Já no século XIX, em 1855, foi iniciada a execução do Túnel Hoosac, em Massachussets, para o modal ferroviário (CHAPMAN; METJE; STARK, 2010). No Brasil, antes de sua independência, as primeiras escavações eram voltadas para a extração de minérios, principalmente, ouro. Muitas dessas escavações se localizavam na região de Ouro Preto, em Minas Gerais. Já na era imperial, o Brasil construiu seus primeiros túneis a partir de 1858, durante a construção da Estrada de Ferro Dom Pedro II (CTB, 2006).

2.5.2 Terminologia básica

As definições adotadas neste item foram adotadas com base nas terminologias utilizadas em PIARC (2015) e Geraldi (2011).

2.5.2.1 Seção Transversal

A seção transversal é um dos principais parâmetros geométricos de um túnel. Nela constam todos os elementos que serão construídos durante a execução do projeto. A seção transversal nada mais é do que a vista de corte transversal do túnel. Também são de extrema

importância a seção de escavação, seção em que é realizada a escavação do túnel, e a seção tipo, que define o formato da seção transversal adotada em projeto (SÃO PAULO, 2005).

2.5.2.2 Arco Invertido

Arco invertido ou reverso é o revestimento do túnel localizado na parte inferior, com forma de anel fechado, utilizado para auxiliar na dissipação de tensões (GERALDI, 2011).

2.5.2.3 Plano de Fogo

Etapa de planejamento de execução de escavação feita por meio de explosivos. Neste plano encontram-se todas as informações necessárias para a execução correta da detonação. Algumas informações usualmente encontradas no plano de fogo são a quantidade de furos, a disposição dos furos, quantidade de carga para cada furo, tipo de explosivos, entre outros (GERALDI, 2011).

2.5.2.4 Pilão

O pilão é a parte central da escavação. Geralmente é o local onde é realizada a primeira abertura. A escavação do pilão pode ser realizada através de perfurações em paralelo, em leque ou em “V” (GERALDI, 2011).

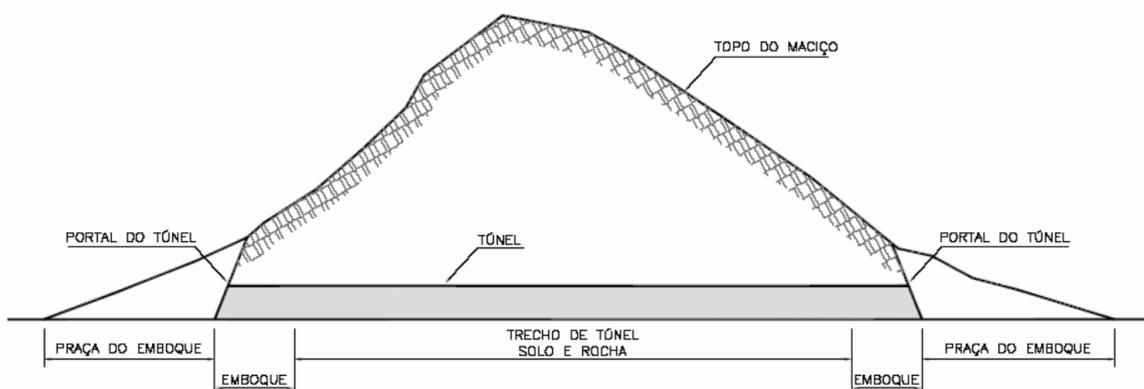
2.5.2.5 Alargamento

O alargamento é a escavação realizada após a execução do pilão. Desta forma a seção de detonação é ampliada. Nesta etapa, as perfurações são realizadas ao redor do pilão e de forma horizontal ao eixo do túnel (GERALDI, 2011).

2.5.2.6 Emboque

Os emboques são as regiões de acesso ao túnel. Geralmente possuem extensão igual a 3 vezes o seu diâmetro, a partir da seção do portal. Para a execução do emboque, é necessário que sejam planejadas e bem executadas as praças de emboque, localizadas em frente ao portal do túnel. A Figura 10 demonstra a localização do emboque em relação ao trecho do túnel (SÃO PAULO, 2005).

Figura 10 – Localização do Emboque



Fonte: São Paulo (2005)

2.5.2.7 Carregamento e Detonação

A etapa de carregamento é constituída pela inserção das cargas explosivas nos furos de detonação. A forma como este processo é executado varia conforme o tipo de explosivo utilizado e do nível de mecanização do projeto. Já a detonação, trata-se do início do fogo dos explosivos. Usualmente, a detonação é realizada a partir da ativação de espoletas elétricas. Caso contrário, ocorre o uso de cordões de detonação (GERALDI, 2011).

2.5.2.8 Tempo de Autossustentação

O tempo de autossustentação, também conhecido como tempo de autossuporte, é o tempo que o maciço rochoso consegue permanecer sem sofrer grandes deformações após a

realização da detonação. Esse tempo de autossuporte varia conforme as características geotécnicas do maciço. Quando o maciço apresenta baixo tempo de autossustentação, é necessária a utilização de sistemas de escoramento ou suporte logo após a finalização da escavação (GERALDI, 2011).

2.5.2.9 Perfuração

A etapa de perfuração consta em realizar furos na frente de escavação. Atualmente esses furos são realizados de maneira mecanizada com o auxílio dos *Jumbos de Perfuração*. Esses jumbos possuem a capacidade de realizar dezenas de perfurações ao mesmo tempo e com precisão georreferenciada (GERALDI, 2011).

2.5.2.10 Sistema de Escoramento e Revestimento

Sistema de escoramento, ou também conhecido como sistema de contenção, é o conjunto de estruturas projetadas para promover a sustentação da escavação. Estes sistemas são de extrema importância para garantir a segurança do túnel. Geralmente os sistemas de contenção são subdivididos em estruturas provisórias e permanentes. As estruturas provisórias são dimensionadas com o objetivo de garantir a manutenção do avanço de escavação. As estruturas permanentes visam garantir a segurança e funcionamento do túnel durante toda a sua vida útil. As principais estruturas de contenção para túneis são: cambotas metálicas; enfilagens; pregagem; tirantes; ancoragens e concreto projetado (SÃO PAULO, 2005); PIARC, 2015).

2.5.3 Classificação Geomecânica

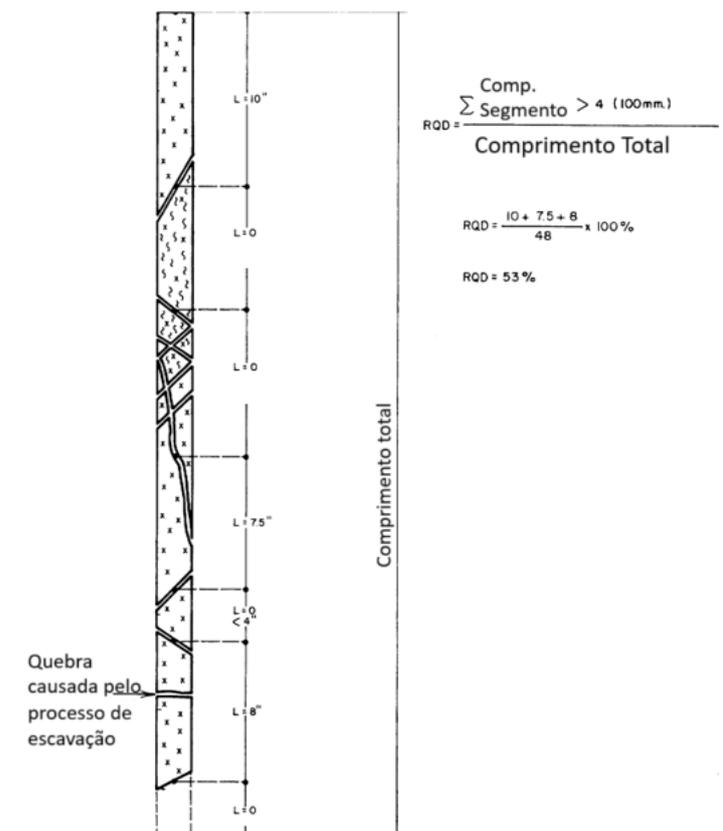
O procedimento de classificação geomecânica é realizado com o propósito de identificar as características mecânicas de um maciço rochoso. Para projetos de túneis, a atividade de classificação geomecânica é fundamental para compreender e prever os principais fatores limitantes para a elaboração do plano de escavação. A partir da classificação, são elaborados os projetos dos sistemas de contenção e revestimento. O presente item apresentará os principais métodos de classificação geomecânica, de maneira

breve. De Castro (2023) apresenta, de maneira detalhada, os principais elementos que compõem a classificação, caracterização e compartimentação de maciços rochosos.

2.5.3.1 Sistema RQD

O Sistema RQD (Rock Quality Designation) foi introduzido por Don U. Deere, que foi pioneiro na elaboração de cálculos empíricos para analisar a qualidade de maciços rochosos. O RQD é reconhecido como um dos primeiros parâmetros quantitativos sobre a qualidade geológica de um maciço. O método pode ser compreendido como a soma dos trechos de um testemunho, obtidos através de sondagens rotativas, com comprimento maior do que 10 cm, e dividido pela extensão total do testemunho, que deve ser maior do que 1 metro (HOEK, 2006). A Figura 11 e a Equação 5 demonstram a aplicação do método.

Figura 11 – Demonstração de aplicação do método RQD



Fonte: Adaptado de HOEK (2006)

Equação 5:

$$RQD = \sum \frac{p}{n} \times 100$$

Em que: p é o comprimento das peças maiores do que 10 cm;

n é o comprimento total do testemunho;

O método RQD possui como resultado a taxa de fraturamento do testemunho escavado, o qual corresponde ao grau de alteração do maciço rochoso. A classificação é definida conforme o grau de degradação, representada pelos patamares de RQD, conforme apresentado na Tabela 3. A classificação elaborada por Deere, por ser um dos primeiros métodos quantitativos, não contempla estratégias ou parâmetros para a definição de sistemas de contenção.

Tabela 3 – Classificação RQD

RQD (%)	Qualidade do maciço rochoso
0-25	Muito Fraco
25-50	Fraco
50-75	Regular
75-90	Bom
90-100	Excelente

Fonte: Adaptado de HOEK, 2006

O RQD também pode ser determinado, de maneira indireta, através de correlações a partir do número de descontinuidades. Desta forma, é possível determinar o valor de RQD quando não há possibilidade de realizar a escavação do testemunho. Palmström (1982) propôs a correlação do RQD com os valores de índice volumétrico, definido como o número de descontinuidades por unidade de comprimento para o conjunto de famílias. A correlação é demonstrada através da Equação 6:

$$RQD = 115 - 3,3j_v$$

Em que: j_v é o número de juntas somadas por unidade de comprimento para todas as famílias.

2.5.3.2 Sistema RMR

O sistema de classificação RMR (*Rock Mass Rating*) foi desenvolvido por Bieniawsk em 1973. O método passou por alterações, com a inclusão de novos parâmetros de caracterização, sendo a versão publicada em 1989 utilizada atualmente (BIENIAWSK (1989)). O sistema possui como princípio a somatória dos valores atribuídos aos 6 parâmetros de classificação, que são:

- I. Resistência a compressão simples;
- II. RQD;
- III. Espaçamento de fraturas;
- IV. Condição das fraturas;
- V. Água subterrânea; e
- VI. Orientação das descontinuidades.

Para cada um dos parâmetros citados, foram atribuídos valores relativos de pontuação. Os valores representam a qualidade do maciço rochoso através de suas características. Portanto, quanto maior a pontuação de RMR, melhores serão as características geomecânicas. A Tabela 4 apresenta os parâmetros com a suas respectivas características e pontuações.

Tabela 4 – Classificação RMR

A. PARÂMETROS DE CLASSIFICAÇÃO E SUAS CLASSIFICAÇÕES									
Parâmetro			Faixa de valores						
1	Força de rocha intacta material	Carga pontual (índice de força)	>10MPa	4-10MPa	2-4 MPa	1-2 MPa	Para esta faixa baixa - o teste de compressão uniaxial é preferível		
		Compressão uniaxial (força)	>250 MPa	100-250 MPa	50-100 MPa	25-50MPa	5-25 MPa	1-5 MPa	<1 MPa
		Avaliação	15	12	7	4	2	1	0
2	Qualidade do teste de perfuração RQD		90%-100%	75%-90%	50%-75%	25%-50%	<< 25%		
	Avaliação		20	17	13	8	3		
3	Espaçamento de		>2m	0,6-2m	200-600mm	60-200mm	<60 mm		
	Avaliação		20	15	10	8	5		
4	Condição de descontinuidades (Ver F)		Superfícies muito ásperas	Superfícies ligeiramente rugosas	Superfícies ligeiramente rugosas	Superfícies lisas	Goivagem macia >5 mm de espessura ou Separação >5 mm Contínuo		
			Não contínuo Sem separação Paredes de rocha intemperizadas	Separação <1 mm Paredes ligeiramente desgastadas	Separação <1 mm Paralelamente desgastadas	ou Goiva <5 mm de espessura ou Separação 1-5 mm			
	Avaliação		30	25	20	10	0		
5	Groundwater (Diretor principal a)	Entrada por 10 m comprimento do túnel (m)	nenhum	<10	10-25	25-125	>125		
		Pressão de água conjunta	0	<0,1	0,1-0,2	0,2-0,5	>0,5		
	Condições Gerais		Completamente seco	Úmido	Árido	Colapsivo	Fluído		
	Avaliação		15	10	7	4	0		
B. AJUSTE DE RATING PARA ORIENTAÇÕES DE DESCONTINUIDADE (Ver F)									
Orientações de ataque e mergulho		Muito favorável	Favorável	Justo	Desfavorável	Muito desfavorável			
Avaliações	Túneis e minas	0	-2	-5	-10	-12			
	Fundações	0	-2	-7	-15	-25			
	Encostas	0	-5	-25	-50				
C. CLASSES DE MASSA ROCHOSA DETERMINADAS DO TOTAL DE CLASSIFICAÇÕES									
Avaliação		100+-81	80+61	60-41	40-21	<21			
Número da classe		I	II	III	IV	V			
Descrição		Pedra muito boa	Boa rocha	Rocha justa	Pobre rocha	Rocha muito pobre			
D. SIGNIFICADO DAS CLASSES DE ROCK									
Número da classe		I	II	III	IV	V			
Tempo médio em pé		20 anos para vão de 15 m	1 ano para vão de 10 m	1 semana para vão de 5 m	10 horas para vão de 2,5 m	30 min para vão de 1 m			
Coesão do maciço rochoso (kPa)		>400	300-400	200-300	100-200	<100			
Ângulo de atrito do maciço rochoso (graus)		>45	35-45	25-35	15-25	<15			
E. DIRETRIZES PARA CLASSIFICAÇÃO DE CONDIÇÕES DE DESCONTINUIDADE									
Comprimento da descontinuidade (persistência)		<1 m	1-3m	3-10 metros	10-20 metros	>20m			
Avaliação		6	4	2	1	0			
Separação (abertura)		Nenhum	<0,1mm	0,1-1,0mm	1-5 mm	>5 mm			
Avaliação		6	5	4	1	0			
Rugosidade		Muito áspero	Duro	Um pouco áspero	Suave	Lado liso			
Avaliação		6	5	3	1	0			
Classificação de preenchimento (goivagem)		Nenhum	Enchimento duro <5 mm	Enchimento duro >5 mm	Enchimento macio <5 mm	Enchimento macio >5 mm			
Avaliação		6	4	2	2	0			
Intemperismo		Intemperizado	Ligeiramente desgastado	Moderadamente resistido	Altamente resistido	De composto			
Avaliação		6	5	3	1	0			
F. EFEITO DO GREVE DE DESCONTINUIDADE E ORIENTAÇÃO DE MERGULHO NO TÚNEL**									
Golpe perpendicular ao eixo do túnel				Golpe paralelo ao eixo do túnel					
mergulho - mergulho 45-90°		mergulho - mergulho 20-45°		Mergulho 45-90°		Mergulho 20-45°			
Muito favorável		Favorável		Muito desfavorável		Justo			
contra mergulho - mergulho 45-90°		contra mergulho - mergulho 20-45°		Dip 0-20-independente da direção da greve =>					
Justo		Desfavorável		Justo					

Fonte: Adaptado de Bieniawsk (1989)

A partir da classificação elaborada por Bieniawski (1989), pesquisadores começaram a estimar os sistemas de contenção para cada um dos níveis de qualidade do maciço rochoso. A Figura 12 sintetiza os sistemas de contenção propostos como ferramenta para auxiliar a elaboração de projetos.

Figura 12 – Guia para elaboração de projeto de sistemas de contenção

TIPO DE MACIÇO ROCHOSO	MÉTODO DE ESCAVAÇÃO	TIRANTES (diâmetro de 20 mm, com calda de cimento)	CONCRETO PROJETADO	CAMBOTAS METÁLICAS
I RMR: 81-100	Face completa. Avanço de 3 m.	Geralmente não precisa suporte exceto tirantes localizados curtos		
II RMR: 61-80	Face completa. Avanço de 1 a 1,5 m suporte pronto a 20 m da face.	Tirantes localizados no teto de 3 m de comprimento e espaçados 2,5 m, malha de aço opcional.	Espessura de 50 mm no teto, onde necessitar.	Nulo
III RMR: 41-60	Frente de escavação em bancadas (berma) 1,5 a 3 m de avanço na calota. Instalação do suporte após cada escavação a fogo. Suporte pronto a 10 m da face.	Tirantes espaçados 1,5 a 2 m, de 4 m de comprimento, no teto e paredes, com malha de aço no teto.	Espessura de 50 a 100 mm no teto e 30 mm nas paredes	Nulo
IV RMR: 21-41	Frente de escavações em camadas. Avanço da calota de 1 a 1,5 m. Instalação do suporte paralelo com a escavação, a 10 m da frente.	Tirantes espaçados 1 a 1,5 m, de 4 a 5 m de comprimento, teto e paredes, com malha de aço	Espessura de 100 a 150 mm no teto e 100 mm nas paredes.	Cambotas metálicas leves a médias, espaçadas de 1,5 m, onde precisar.
V RMR: < 20	Múltiplas frentes. Avanço da calota de 0,5 a 1,5 m. Instalação do suporte paralelo com a escavação. Concreto projetado logo que possível após a escavação fogo.	Tirantes espaçados 1 a 1,5 m, de 5 a 6 m de comprimento em teto e paredes com malha de aço, atirantado invertido.	Espessura de 150 a 200 mm no teto e 150 mm nas paredes, e 50 mm na face.	Cambotas metálicas médias a pesadas, espaçadas de 0,75 m, com aduelas de aço. Arco invertido.

Fonte: Filho (2008)

2.5.3.3 Sistema Q de Barton

Barton *et al.* (1974) elaboraram uma equação empírica com parâmetros que sintetizam as características geomecânicas, com o objetivo de realizar a classificação de maciços rochosos. O estudo foi desenvolvido a partir de análises de dados geológicos de diversas escavações de túneis. Basicamente, o Sistema Q de Barton utiliza 6 índices de cálculo, assim como o Sistema RMR, que possuem suas classificações e pontuações

relativas. A equação elaborada por Barton *et al.* (1974) e os índices estão descritos na Equação 7:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}$$

Em que: RQD é o índice de qualidade da rocha; J_n é o índice de influência das famílias; J_r é o índice de influência da rugosidade; J_a é o índice de alteração da rocha; J_w é o índice de permeabilidade; e SRF é o índice do estado de tensões.

Ao analisar a equação de Barton *et al.* (1974), é possível descrevê-la realizando a segmentação dos três quocientes. O primeiro deles, refere-se basicamente ao tamanho dos blocos de rocha maciços. Quanto maior for o tamanho do bloco, maior será o valor deste segmento, o que representa menos falhas e descontinuidades. O segundo segmento da equação, representa as características do maciço com relação a sua resistência ao cisalhamento. Com relação ao último quociente, ele tem por objetivo descrever os efeitos da pressão exercida pela presença de água, e das tensões efetivas da vizinhança da posição da escavação.

A pontuação para cada um dos índices e a descrição de suas características foram desenvolvidas em forma de tabelas subdividas que auxiliam na identificação e escolha dos parâmetros que melhor representam as características do maciço em análise. Além das tabelas, o método de classificação de Barton apresenta um ábaco para estimar o tempo de autossustentação da escavação e os tipos de sistemas de contenção que podem ser utilizados conforme o valor final de Q e o diâmetro da escavação. As Tabela 5 e Tabela 6 apresentam os parâmetros e as referidas pontuações e a Figura 13 demonstra o ábaco.

Tabela 5 – Primeira parte dos parâmetros de Barton

Rock Quality Designation, RQD	a: Muito pobre b: Pobre c: Justo d: Bom e: Excelente	RQD 0-25 25-50 50-75 75-90 90-100	Onde RQD é relatado ou medido como 10 (incluindo 0), um valor nominal de 10 é usado para avaliar Q Intervalos RQD de 5, ou seja, 100, 95, 90, etc., são suficientemente precisos
Número do Conjunto Conjunta, J_n	a: Enorme, nenhuma ou poucas articulações b: Um conjunto conjunto e: Um conjunto conjunto mais aleatório d: Dois conjuntos de juntas e: Dois conjuntos conjuntos mais aleatórios f: Três conjuntos de juntas 8: Três conjuntos conjuntos mais aleatórios h: Quatro ou mais conjuntos de juntas, aleatórios, fortemente articulados cubo', etc. j: Pedra britada, semelhante à terra	J_n 0,5-1,0 2 3 4 6 9 12 15 20	Para interseções, use (3,0 x J _n). Para portais, use (20xJ)
Número de rugosidade conjunta, J_r	(1) Contato com parede rochosa e (i) Contato com a parede rochosa antes do cisalhamento de 10 cm a: Junta descontinua b: Áspero ou irregular, ondulado c: Suave, ondulado d: Liso, ondulado e: Áspero ou irregular, plano f: Suave, plano g: Slickensided, plano (don't) Nenhum contato com a parede rochosa quando cisalhado h: Zona contendo minerais argilosos espessos o suficiente para evitar Contato com a parede rochosa j: Zona arenosa, pedregosa ou britada com espessura suficiente para evitar o contato com a parede rochosa	J_r 4 3 2,0 1,5 1,5 1,0 0,5 1,0 1,0	Adicione 1,0 se o espaçamento médio do conjunto de junções relevante for superior a 3m. J = 0,5 pode ser usado para juntas planas com lados lisos com lineamento, desde que os lineamentos sejam favoravelmente orientado. As descrições b referem-se conjuntamente a recursos de pequena escala e recursos de escala intermediária, nessa ordem.
Número de alteração conjunta, J_a	(1) Contato com parede rochosa a: Enchimento bem cicatrizado, duro, não amolecido e impermeável, ou seja, quartzo ou epidoto b: Paredes das juntas ligeiramente alteradas, apenas manchas superficiais. c: Paredes das juntas ligeiramente alteradas. Revestimentos minerais não amaciantes, partículas arenosas, rocha desintegrada sem argila, etc. d: Revestimentos de argila siltosa ou arenosa, pequena fração de argila (softening) e: Revestimentos argilominerais amaciantes ou de baixa fricção, i.e., caulinita, mica, Também clorito, talco, gesso e grafite, etc., e pequenas quantidades de argilas expansíveis (revestimentos descontinuos, 1-2 mm ou menos de espessura) (1) Contato com a parede rochosa antes do cisalhamento de 10 cm: partículas de areia, rocha desintegrada sem argila, etc. 8: Recheios argilosos minerais fortemente consolidados e não amolecidos (contínuos, <5 mm de espessura) h: Superconsolidação média ou baixa, amolecimento, recheios argilominerais (contínuos, 5 mm de espessura) j: Obturações de argila expansível, ou seja, montmorilonita (contínua, <<5 mm de espessura). Valor de 1, depende da porcentagem de partículas inchadas do tamanho de argila e do acesso à água, etc.	J_a 0,75 1,0 2,0 3,0 4,0 4,0 6,0 8,0 8,0-12,0	♦ (aprox.) Valores de, pretendem ser um guia aproximado das propriedades mineralógicas dos produtos de alteração, presentes 25°-35° 25°-30° 20-25 ° 8-16 ° 25°-30° 16"-24 ° 12-16 ° 6-12 °

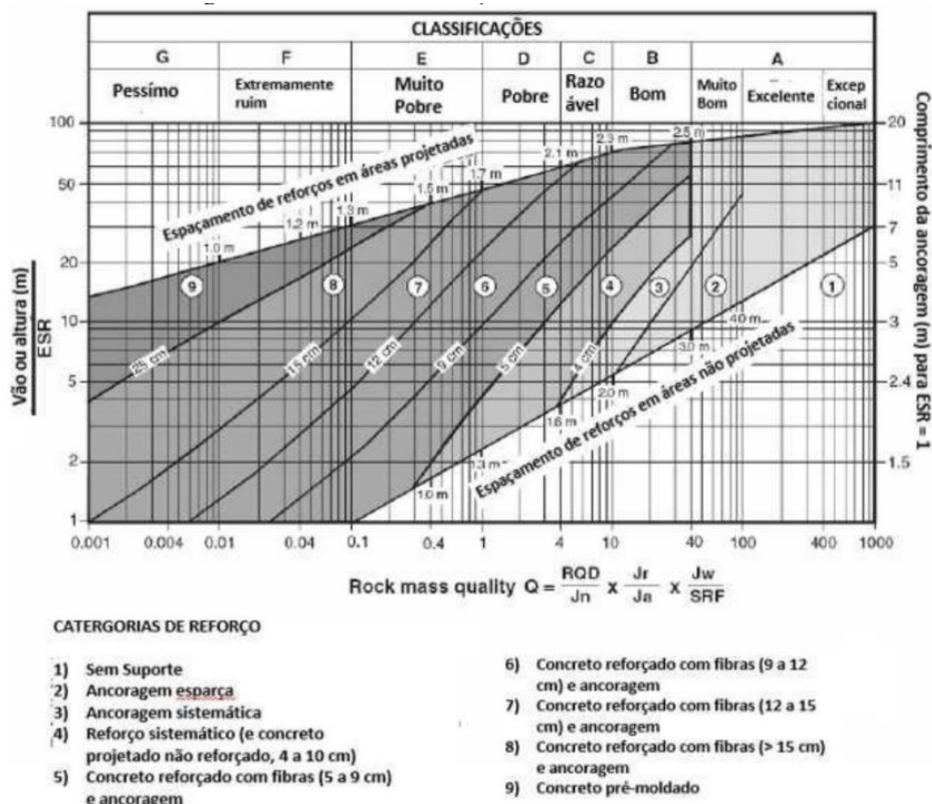
Fonte: Adaptado de Hudson e Harrison (1997)

Tabela 6 – Segunda parte dos parâmetros de Barton

Número de alteração conjunta, J₁	(ii) Nenhum contato com a parede rochosa quando cisalhado k: Zonas ou faixas de rocha e argila desintegradas (ver g., h.; para descrição da condição da argila) 1: Zonas ou faixas de argila siltosa, pequena fração de argila (não amolecida) m: Zonas espessas e contínuas ou faixas de argila (ver g., h.; para descrição do condidon de argila)	6,0, 8,0 ou 8,0-12,0 5,0 10,0, 13,0 ou 13,0-20,0	6-24 *
Fator de Redução de Estresse, SRF	<p>(1) Zonas de fraqueza que cruzam a escavação, que podem causar afrouxamento da massa rochosa quando o túnel é escavado a:</p> <p>Múltiplas ocorrências de zonas de fraqueza contendo argila ou rocha quimicamente desintegrada, rocha circundante muito solta (qualquer profundidade)</p> <p>ser Zonas de fraqueza únicas contendo argila ou rocha quimicamente desintegrada (profundidade de escavação <50 m) e: Zonas de fraqueza únicas contendo argila ou rocha quimicamente desintegrada rocha desintegrada (profundidade de escavação >50 m)</p> <p>d: Múltiplas zonas de cisalhamento em rocha competente (sem argila), solta rocha circundante (qualquer profundidade)</p> <p>e: Zonas de cisalhamento simples em rocha competente (sem argila) (profundidade de escavação <50 m)</p> <p>f: Zonas de cisalhamento simples em rocha competente (sem argila) (profundidade de escavação >50 m) g: Juntas abertas soltas, fortemente articuladas ou 'cubo de açúcar', etc. (qualquer profundidade)</p> <p>(i) Rocha competente, problemas de tensão na rocha h: Tensão baixa, perto da superfície</p> <p>J: Tensão média</p> <p>k: Estrutura de alta tensão e muito estanque (geralmente favorável à estabilidade, pode ser desfavorável à estabilidade da parede)</p> <p>l: Explosão de rocha leve (rocha maciça) m: Explosão de rocha pesada (rocha maciça)</p> <p>(ii) Espremer rocha; fluxo plantado de rocha incompetente sob a influência de altas pressões rochosas n: Pressão de rocha de compressão leve p: Pressão de rocha de compressão forte</p> <p>(iv) Rocha inchada; atividade de inchaço químico dependendo da presença de água q: Pressão de rocha com inchaço leve r: Pressão de rocha com inchaço pesado</p>	<p>SRF</p> <p>100</p> <p>50</p> <p>25</p> <p>10</p> <p>5</p> <p>2,5</p> <p>1,0</p> <p>0,5-2,0</p> <p>5-10</p> <p>10-20</p> <p>5-10</p> <p>10-15</p>	<p>Reduza estes valores SRF em 25-50%, as zonas de cisalhamento relevantes apenas influenciam, mas não cruzam a escavação</p> <p>σ_3/σ_1 σ_2/σ_1</p> <p>>200 >13 Poucos registros de casos disponíveis onde a profundidade da coroa abaixo da superfície é menor que a largura do vão. Sugira aumento do SRF de 2,5 para 5 para tais casos</p> <p>200-10 13-0,66</p> <p>10-5 0,66-0,33 5-2,5 0,33-0,16 22,5 <0,16</p> <p>Para campo de tensões fortemente anisotrópicas (iv medido): quando $550/0,510$, reduzir σ e σ_3 para 0,80 e 0,80; quando $a/a > 10$, reduza σ e a para 0,60 e 0,60, (onde resistência à compressão não confinada, resistência à tração (carga pontual) e a, tensões principais maiores e menores)</p>
Fator Conjunto de Redução de Água, J₂	<p>a: Escavações secas ou influxos menores, por ex. 5 Vmin localmente b: Entrada ou pressão média, saída ocasional de preenchimentos</p> <p>c: Grande influxo ou alta pressão em rocha competente com juntas não preenchidas d: Grande entrada ou alta pressão, saída considerável de obstruções de juntas</p> <p>e: Entrada ou pressão de água excepcionalmente alta na detonação, decaindo com o tempo</p> <p>f: Entrada excepcionalmente alta ou pressão de água continuando sem deterioração perceptível</p>	<p>J₂</p> <p>1,0</p> <p>0,66</p> <p>0,5</p> <p>0,33</p> <p>0,2-0,1</p> <p>0,1-0,05</p>	<p>Aproximadamente, pressão da água (kg/cm²)</p> <p><1</p> <p>1,0-2,5</p> <p>2,5-10,0</p> <p>2,5-10,0</p> <p>>10,0</p> <p>>10,0</p> <p>Fatores c para avaliar estimativas brutas. Aumente as medidas de drenagem Jif instaladas</p> <p>Problemas especiais causados pela formação de gelo não são considerados</p>

Fonte: Adaptado de Hudson e Harrison (1997)

Figura 13 – Ábaco do Sistema Q de Barton



Fonte: Pereira (2016)

2.5.4 Métodos Construtivos

2.5.4.1 Drill and Blast

O método *Drill and Blast*, Perfurar e Detonar, em tradução livre, remete ao processo sistemático de perfurar o solo e executar a detonação de cargas. É considerado um método de ampla usabilidade em diversos tipos de rocha. Possui a vantagem de ser altamente personalizável, devido os diferentes tipos de perfuração e carga possíveis. Outra vantagem deste método é a capacidade de proporcionar diferentes tipos de seção transversal, e maleabilidade para mudanças de traçado. Os investimentos iniciais para a execução do método *Drill and Blast* são consideravelmente menores em comparação com as escavações realizadas por tuneladoras, segundo Geraldí (2011).

Em relação as desvantagens desse método, é possível citar a baixa velocidade de avanço devido ao sistema de execução. Não é possível proceder mais de uma etapa em conjunto. O sistema de execução é elaborado através das seguintes etapas:

- a) Perfuração: realização dos furos na frente de escavação. Geralmente são executados horizontalmente ao eixo de escavação e em paralelo. A perfuração pode ser feita através de jumbos com perfuratrizes de braços mecânicos ou de manual através de perfuratrizes pneumáticas;
- b) Carregamento: momento de em que as cargas são inseridas nos furos junto com os seus detonadores. Geralmente as cargas são constituídas de explosivos e os detonadores são espoletas elétricas;
- c) Detonação: Início do acionamento dos detonadores das cargas inseridas nos furos. A detonação começa geralmente pelo pilão, e depois são detonadas as áreas periféricas;
- d) Ventilação: Trata-se do processo para retirar os gases tóxicos gerados pelos elementos químicos presentes nos explosivos através da insuflação de ar limpo para a frente de escavação;
- e) Limpeza: A última etapa do processo é a realização da retirada das rochas detonadas. Geralmente são utilizados equipamentos rodoviários como caminhão basculante, escavadeira, entre outros. Em alguns casos, que apresentam solos com geomecânica de baixa resistência, são empregados, logo em seguida, os equipamentos de contenção.

2.5.4.2 NATM

O *New Austrian Tunnelling Method*, traduzido como Novo Método Austríaco de Tunelamento, foi desenvolvido pelos austríacos Landislaus Von Rabecwicz, Leopold Müller e Franz Pacher durante a década de 50. Diferentemente dos outros métodos de escavação, o NATM não apresenta uma forma sistemática de execução. Na realidade não há uma única definição que represente este método. O principal princípio definido pelo NATM é compreender que a principal estrutura de sustentação da escavação é o próprio solo. Infelizmente, este princípio também está presente de certas maneiras em outros métodos. Então, o que realmente diferencia o NATM é a necessidade do acompanhamento das deformações através do monitoramento para garantir a estabilidade da escavação (CHAPMAN, METJE e STARK, 2010).

Outro fator que diferencia o NATM é a introdução do concreto projetado como um novo elemento de suporte. Ele é capaz de melhorar a conexão entre o solo escavado e o sistema de contenção por garantir um menor espaçamento e vazios, criando uma coesão entre os elementos.

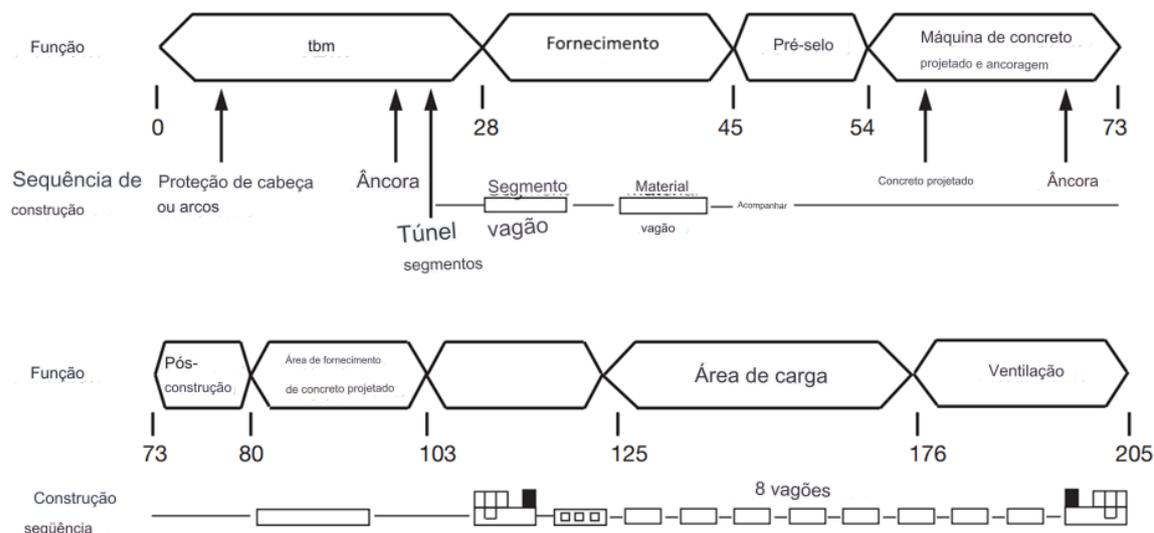
Através do método NATM a capacidade do avanço de escavação foi aprimorada, principalmente pelo desenvolvimento de estudos sobre o tempo de autossustentação e seleção de equipamentos de contenção mais precisos. Além disso, os custos e a utilização dos materiais para a execução de túneis foram reduzidos, proporcionando o aperfeiçoamento dos projetos de engenharia (CHAPMAN, METJE e STARK, 2010).

2.5.4.3 TBM

O método de Escavação de Túneis por Máquinas, do inglês, *Tunnel Boring Machine* (TBM) é completamente diferente dos outros métodos. Ele é constituído basicamente por uma máquina chamada de “tuneladora” que realiza a escavação através de ranhuras no solo através da sua roda de corte, também conhecida como cabeça de corte. A cabeça de corte é constituída por diversos discos de corte, constituídos de diversos materiais, selecionados conforme a geologia do local da escavação (CHAPMAN, METJE e STARK, 2010).

Ao analisar a metodologia de escavação TBM é possível citar algumas vantagens que ela possui em relação aos outros métodos. As tuneladoras apresentam em sua constituição partes complexas que executam alguns processos simultaneamente durante a escavação, como por exemplo, a inserção do sistema de contenção e limpeza das rochas cortadas. O fato de inserir os elementos de contenção e revestimento praticamente ao mesmo tempo em que a escavação é realizada, proporciona baixos níveis de deformação do solo. Por este motivo, as tuneladoras são indicadas para a execução de túneis em áreas urbanas, em que a altura de cobertura até a posição da escavação é reduzida. Geralmente as tuneladoras apresentam uma estrutura de proteção (*Shield*) na frente de corte, que pode ser simples ou dupla, que garantem uma maior segurança durante a escavação (CHAPMAN, METJE e STARK, (2010); ARDESHANA, PITRODA e BHAVSAR (2016). A Figura 14 apresenta uma composição usual dos componentes de uma tuneladora.

Figura 14 – Descrição dos componentes de uma tuneladora.



Fonte: Adaptado de Chapman, Metje e Stark (2010)

O TBM também apresenta alguns pontos negativos. O principal deles é com relação ao seu alto custo de implantação e manutenção. Outro fator importante é que cada máquina tuneladora apresenta a sua dimensão definida, por tanto não é possível realizar alterações na seção transversal do túnel. Em alguns casos, o projeto é definido com base na máquina tuneladora disponível. Uma maneira de solucionar este problema é através da utilização do método *Drill and Blast* para adequar a seção-tipo do túnel conforme o projeto estipulado. Outro ponto negativo do TBM é a baixa capacidade de realizar curvas de raio pequeno durante a escavação. Geralmente os túneis que utilizam o TBM são retilíneos em seu projeto geométrico (CHAPMAN, METJE e STARK, 2010).

2.5.4.4 Cut-and-Cover

O método de escavação *Cut-and-Cover*, Cortar-e-Cobrir, em tradução livre, apresenta uma abordagem diferente da maioria dos métodos. Como o próprio nome indica, o processo de execução por este método é realizado basicamente através do corte do solo, com auxílio de elementos de contenção, e depois o cobrimento do corte através do próprio solo. Geralmente o tipo de corte realizado é em vala contraventada ou ancorada.

Este método é muito utilizado para construção de túneis em regiões urbanas que apresentam restrições geográficas, principalmente envolvendo estruturas residenciais.

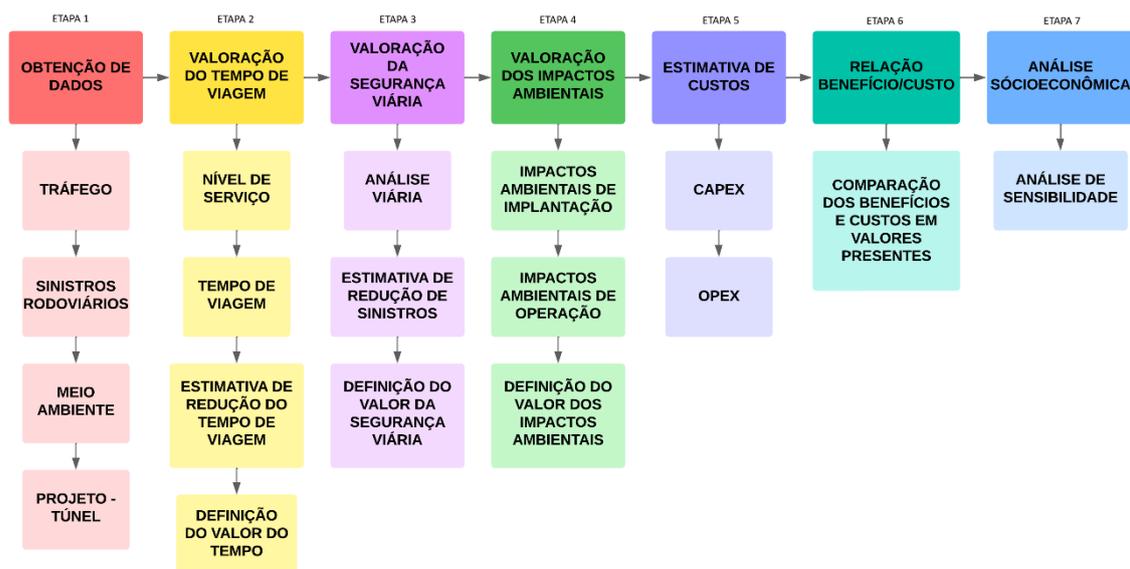
Torna-se um método interessante quando a profundidade de escavação é muito rasa. O *Cut-and-Cover* pode ser utilizado para o transporte de líquidos (água, óleo, esgoto), mas também é aplicado para túneis rodoviários e ferroviários, principalmente metrô. Outra vantagem deste tipo de escavação é a diminuição dos riscos durante a execução.

Para executar uma escavação pelo método *Cut-and-Cover* existem duas formas básicas: *Bottom-up e Top-down*. Na primeira solução, a escavação começa pela superfície do solo e continua até atingir o nível desejado, e depois é coberta novamente. Já na segunda forma, a escavação é iniciada pela superfície e então é feita a cobertura com o uso de estruturas de concreto. A continuidade da escavação é feita através de túneis de acesso lateral com o mesmo nível de profundidade escavado. As estruturas de contenção lateral para este tipo de escavação são similares as utilizadas na construção civil quando são necessárias estruturas em subsolo. As principais estruturas de contenção são as paredes-diafragma, pranchas metálicas, paredes de concreto pré-fabricadas com o auxílio de tirante, entre outras (CHAPMAN, METJE e STARK, (2010)).

3 PROPOSTA DE MÉTODO

O método de análise socioeconômica ex-ante, proposto no estudo, segue as etapas apresentadas pela Figura 15.

Figura 15 – Etapas de elaboração do método proposto



Fonte: Autor (2023)

O método proposto conta com 7 etapas. A primeira delas trata-se da obtenção dos dados básicos iniciais sobre o projeto do túnel e da área de interesse. Os dados principais apresentados, serão utilizados como base para o cálculo da valoração dos impactos diretos propostos.

A segunda etapa refere-se ao cálculo da valoração do impacto direto proporcionado pelo tempo de viagem. Neste ponto serão considerados os valores de tempo de viagem para o cenário presente, sem a presença do empreendimento em estudo, e as estimativas de tempo de viagem após a construção do túnel.

A terceira etapa é constituída da valoração dos impactos relacionados a segurança viária. Nesta etapa serão considerados os sinistros ocorridos na área de interesse e as estimativas do número total de sinistros para a situação após a implantação do túnel. Já a quarta etapa aborda as análises realizadas para estimar os impactos proporcionados pelo empreendimento ao meio ambiente.

A quinta etapa trata sobre a estimativa dos custos atrelados ao empreendimento. Devem ser estimados nesta etapa os custos de implantação, *Capex*, assim como os custos de manutenção e operação, *Opex*. A sexta etapa é proposta para o cálculo da relação benefício/custo. Neste ponto, todos os benefícios devem ser somados de forma monetária e divididos pela somatória de todos os impactos negativos. A última etapa busca aprimorar a avaliação dos impactos negativos e positivos. São levados em consideração nesta etapa fórmulas matemáticas que buscam trazer para o presente todos os impactos estudados dentro do tempo de análise.

Os itens a seguir apresentarão de forma mais detalhada cada etapa do método proposto.

3.1 OBTENÇÃO DOS DADOS

O presente item apresentará os principais dados de entrada necessários para realizar a análise de interesse. Além disso, serão discutidos os principais métodos práticos de obtenção de dados encontrados na literatura. Entretanto, caso os dados de interesse já tenham sido coletados por órgãos públicos ou que estejam disponíveis para acesso de forma gratuita, estes devem ser utilizados com o objetivo de reduzir os custos e o tempo de elaboração da análise.

3.1.1 Tráfego

Os dados básicos de tráfego para a elaboração de uma análise socioeconômica ex-ante, começam pela obtenção do Volume de Tráfego Médio Diário Anual (VMDa). O VMDa pode ser definido como sendo a média aritmética de todo o volume de tráfego medido durante o ano em uma via ou segmento de via dividido pelo número de dias do ano. Devido aos custos elevados para a obtenção do volume de maneira contínua e pelo tempo necessário de coleta de dados, usualmente o VMDa é calculado de maneira indireta através de equações com fatores de expansão, como apresentado no capítulo 2 do presente estudo. O VMDa é o ponto inicial necessário para realizar a caracterização do tráfego da área de interesse e pode ser utilizado como dado de entrada para a elaboração de outras análises de tráfego como

nível de serviço, dimensionamento de interseções, microsimulações de tráfego, entre outros.

Atualmente, a obtenção de dados sobre o VMDa pode ser realizada através diversas técnicas e tecnologias. Podem ser citadas aqui, brevemente, os métodos de rede de sensores urbanos, análise de imagens via satélite e de *drones* e utilização de informações de dados de dispositivos móveis. Azevedo (2023) elaborou um estudo sobre métodos de obtenção de matrizes de origem destino, apresentando uma comparação entre os métodos de obtenção de dados tradicionais e através de dados móveis. Em suas considerações, o autor constatou que a combinação de diferentes métodos de obtenção de dados de tráfego podem ser uma saída interessante para esta tarefa complexa. Outro ponto importante informado pelo autor, é a dificuldade de realizar a caracterização dos movimentos de tráfego obtidos pelo método dos dados móveis.

Outros fatores de tráfego que são importantes de serem obtidos são a velocidade média, atrasos e congestionamentos, densidade de tráfego, horário de pico, entre outros. Todos esses dados auxiliam na caracterização do transporte na área de interesse. Desta forma, a valoração dos benefícios diretos que o empreendimento pode exercer sobre o tráfego será calculado de maneira mais precisa.

3.1.2 Sinistros Rodoviários

Os dados sobre os sinistros rodoviários são essenciais para a caracterização e avaliação da segurança viária para a área de interesse. A partir desses dados, é possível identificar as principais causas de sinistros de trânsito na região e os principais pontos concentradores de ocorrências. A avaliação das causas de sinistros viários são fundamentais para realizar a compreensão dos principais fatores de risco e propor contramedidas que podem promover a redução da gravidade ou o número de sinistros.

Os principais dados sobre os sinistros rodoviários são: a localização, data e hora, causa e tipo, número e tipo de veículos envolvidos, gravidade e condições meteorológicas. Além desses, existem outras informações que podem corroborar para a análise de segurança viária, como por exemplo, idade e sexo dos envolvidos. Entretanto, para realizar a análise de segurança viária, os itens primariamente citados são fundamentais.

Usualmente, os dados de sinistros viários podem ser obtidos através de dados abertos de órgãos públicos responsáveis pela operação e gestão da via, ou por entidades de segurança pública. Caso a via de interesse pertença a entidades privadas ou sejam rodovias concedidas, é necessário solicitar à concessionária ou empresa privada os dados registrados pela gestão.

Outro dado importante para elaboração da análise dos impactos envolvendo a segurança viária são as características dos elementos de infraestrutura que envolvam os dispositivos de segurança. Caso o método de avaliação da segurança viária seja preditivo, ou seja, envolvam a análise dos riscos aos usuários, a avaliação dos elementos viários torna-se necessária.

3.1.3 Meio Ambiente

A análise abrangente dos impactos ambientais, referentes a implantação de um novo empreendimento, está atrelada a qualidade e precisão dos fatores avaliados. Usualmente, em um projeto de engenharia, é necessária a elaboração do EIA e RIMA como apresentado no capítulo 2 do presente trabalho.

Para uma análise socioeconômica *ex-ante* o Relatório Preliminar de Avaliação Ambiental é o estudo mais apropriado. Neste ponto, são necessárias a coleta e inspeções *in loco* por profissionais especializados. Neste relatório são apresentadas as informações e dados básicos sobre a caracterização ambiental da área de interesse, que servirá de apoio para a definição dos impactos ambientais e a sua valoração para a análise socioeconômica. Neste relatório, poderão estar incluídos dados referentes a caracterização da fauna local, recursos hídricos, qualidade do solo, consumo de recursos naturais, resíduos, entre outros. Esses dados geralmente estão associados aos impactos ambientais de implantação do projeto. Entretanto, para uma análise dos impactos ambientais envolvendo, especialmente túneis rodoviários, outros dados, como por exemplo, níveis de ruído e vibração e qualidade do ar, devem ser obtidos e analisados, tanto para o momento da implantação do projeto quanto para o período de operação.

3.1.4 Projeto do Túnel

As informações sobre o projeto do túnel em uma análise socioeconômica ex-ante é fundamental. Por se tratar de uma análise que ocorre anteriormente a execução do empreendimento, o nível de detalhamento das informações de projeto, determinarão o nível de disparidade entre os impactos que são esperados e aqueles que ocorrerão efetivamente após a finalização da obra.

Para a situação de uma análise ex-ante o mínimo esperado de informações sobre o projeto de um túnel são aquelas presentes em um estudo de viabilidade ou estudo preliminar. Os pontos principais que usualmente são elaborados em um estudo preliminar de túnel rodoviário são: exequibilidade, viabilidade e estimativa preliminar de custos.

Os estudos preliminares possuem o principal objetivo de levantar os parâmetros limitantes para a execução do túnel. São essas informações que balizam o desenvolvimento do projeto. De certa forma, alguns dos dados elaborados em um estudo preliminar de túnel rodoviário são apresentados de maneira qualitativa. Sobre as estimativas de custos, estas geralmente levam em consideração os itens mais expressivos no orçamento, como por exemplo, escavação, revestimento, tratamento e emboque (SÃO PAULO, 2005).

O dado principal com relação às informações de projeto é a estimativa de custos. Conforme o projeto é desenvolvido, mais assertiva é a projeção dos custos. Devido a isso, a confiabilidade e a precisão da análise socioeconômica estão atreladas a conjectura dos custos. O ideal, é que pelo menos esteja disponível os dados dos estudos preliminares. Caso não haja esta possibilidade, é usual que os custos sejam estimados com base em outros projetos de túnel já concluídos. Dessa forma, é possível obter uma avaliação inicial da magnitude dos valores esperados.

3.2 VALORAÇÃO DO TEMPO DE VIAGEM

A valoração do tempo de viagem é um dos itens mais críticos para a realização de uma análise socioeconômica. Segundo Ferrari *et al.* (2020), o tempo de viagem é o benefício de maior interesse social. Além disso, a definição do valor do tempo possui grande influência na análise socioeconômica, principalmente devido à alta sensibilidade na análise de risco. A

alteração na definição do valor do tempo pode causar a mudança na avaliação da viabilidade de um empreendimento rodoviário, principalmente para regiões de alto volume de tráfego.

O presente item abordará os principais aspectos sobre a valoração do tempo de viagem. Serão apresentados os principais itens e os métodos de obtenção de cada requisito necessário para compor a valoração do tempo de viagem.

3.2.1 Nível de Serviço

O nível de serviço, do inglês *Level of Service* (LOS), é uma medida que descreve a qualidade e a eficiência de um serviço de transporte. Basicamente, o LOS é um índice que descreve o nível de conforto dos usuários com relação aos aspectos sobre a frequência, pontualidade, conforto, segurança e confiabilidade dos serviços de transporte. Além disso, o LOS pode ser utilizado como instrumento para avaliar o nível de satisfação dos usuários com relação aos sistemas de transporte.

O LOS geralmente é categorizado em diferentes níveis com base em parâmetros específicos de desempenho. Esses parâmetros podem incluir: o número de viagens realizadas, condições físicas do ambiente de transporte, como espaço, assentos disponíveis, e climatização, percepção de segurança física e segurança contra crimes e consistência do serviço em termos de tempo de viagem e intervalos entre veículos. Usualmente, o nível de serviço é categorizado em patamares, partindo do nível A, de maior qualidade, até o nível F, de pior qualidade.

A relação entre o LOS e a valoração do tempo de viagem é complexa. Melhorias no nível de serviço geralmente reduzem os impactos negativos do tempo de viagem. Desta forma, a análise da valoração do tempo de viagem pode começar pela definição do nível de serviço. Caso o nível de serviço calculado esteja próximo ao F, pode ser considerada a necessidade de investimentos em novos empreendimentos ou políticas públicas para garantir maior conforto aos usuários, como por exemplo, a redução do tempo de viagem.

Para determinar o nível de serviço, existem diversos métodos. O *Highway Capacity Manual* (2010) usualmente é considerado um dos principais métodos de avaliação do nível de capacidade e serviço de uma rodovia. No manual, são apresentados os parâmetros de avaliação e os fatores que compõem as equações matemáticas. Além do manual, existem

softwares de microssimulação de tráfego que definem o nível de serviço de uma interseção ou via conforme os parâmetros de entrada estipulados pelo projetista.

3.2.2 Tempo de Viagem

O tempo de viagem é um dos principais fatores decisivos para realizar o cálculo da valoração do tempo de viagem. O tempo de viagem pode ser obtido através de métodos simples, como a fração entre a distância do percurso e velocidade média ou velocidade regulamentar. Outra forma de definir o tempo de viagem é através da aplicação de questionários para os usuários da via, para perguntar o tempo médio praticado entre os pontos de interesse.

Usualmente, o tempo de viagem pode ser determinado dois tipos de método: direto e indireto. A seleção do tipo de método está atrelada ao contexto do projeto, que pode proporcionar dados e recursos suficientes para a utilização do método direto. Caso o projeto esteja em um estágio inicial, como por exemplo, estudo preliminar, o método indireto é geralmente utilizado, principalmente devido a limitação de recursos.

Os métodos diretos são definidos como aqueles em que a obtidos através da resposta direto dos usuários, geralmente elaborado através da aplicação de questionários ou outro meio de pesquisa. Este método exige a aplicação de longo período de pesquisa e disponibilidade de tempo dos usuários para o preenchimento do questionário.

Já os métodos indiretos, dimensionam o tempo de viagem através da estimativa inicial do tempo médio de viagem. Essa estimativa pode ser obtida pela realização do trajeto de forma cronometrada repetidamente. O tempo de viagem pode ser obtido de forma indireta através de microssimulações de tráfego. Para utilizar a microssimulação, são necessário parâmetros de entrada, como por exemplo, dados de volume de tráfego e velocidade operacional da via.

3.2.3 Definição do Valor do Tempo

O valor do tempo de viagem é um fator essencial para a elaboração do planejamento e na economia do transporte. Essa medida pode ser utilizada na elaboração de projetos de infraestrutura, assim como na formulação de políticas públicas. O valor do tempo de viagem

é um parâmetro importante que pode influenciar na avaliação da viabilidade de um novo empreendimento rodoviário ou na melhoria de serviços. Além disso, possui papel importante na tomada de decisão de órgãos públicos, o que proporciona alteração na eficiência geral das redes de transporte.

A estipulação do valor do tempo de viagem é provavelmente a parte mais crítica para determinar a valoração do tempo de viagem. O valor do tempo apresenta grande sensibilidade neste parâmetro da análise socioeconômica. Isso se deve principalmente ao efeito exponencial que a alteração deste termo pode ocasionar no valor final da valoração do tempo de viagem.

A determinação do valor do tempo usualmente é desenvolvida através de um dos dois métodos: disposição a pagar, do inglês *Willingness to Pay* (WTP) ou valor médio horário de trabalho. O método da Disposição a Pagar (WTP) avalia quanto os indivíduos estão dispostos a pagar para garantir um bem ou serviço. Para o tema em discussão, o WTP serve para mensurar o quanto os usuários estariam dispostos a pagar para reduzir o tempo de viagem. O WTP pode ser obtido através de diversos métodos, entretanto geralmente é obtido através da aplicação de questionários aos usuários. Esse método é conhecido como preferência declarada. Possui a vantagem de obter um valor médio de forma direta através da opinião de usuários da via de interesse, entretanto necessita de recursos técnicos e financeiros.

O segundo método de determinação do valor do tempo de viagem é baseado na estimativa deste parâmetro com base na renda média dos usuários. Esse método parte do princípio de que o tempo de viagem é um custo de oportunidade que pode ser comparado ao valor do tempo de trabalho. Desta forma, o método iguala o valor de tempo de viagem como uma fração do salário horário do indivíduo. Este método possui a vantagem de ser simples e direto, e pode ser elaborado com dados disponibilizados de forma pública. Entretanto, possui a desvantagem de não capitalizar de forma efetiva o valor em que todos os usuários concordariam em pagar pelo aprimoramento do serviço.

3.3 VALORAÇÃO DA SEGURANÇA VIÁRIA

Os impactos socioeconômicos associados aos sinistros viários são significativos. A magnitude desses impactos é difícil de ser mensurada. Eles influenciam a qualidade de vida

dos usuários da via que estão susceptíveis a danos físicos e psicológicos. Além disso, existem diversos fatores atrelados aos impactos causados pelos sinistros viários que podem ser apresentados.

Os impactos negativos causados pelos sinistros viários estão conectados a diversos setores econômicos e administrativos. A ocorrência de sinistros viários demanda esforços dos sistemas de segurança pública e de saúde. Esses esforços geram despesas de recursos que poderiam ser aplicados em outras áreas de interesse público. Além disso, a ocorrência de sinistros proporciona impactos na mobilidade e eficiência no sistema de transporte. Somados a isto, ainda existem os custos diretos proporcionados pelos sinistros, que vão desde apenas perdas de recursos materiais até os custos atrelados aos impactos fisiológicos e de óbito.

O presente item apresentará os principais dados de entrada necessários para calcular a valoração da segurança viária para compor a análise socioeconômica. Além disso, serão apresentados alguns métodos práticos de obtenção da valoração da segurança viária. Caso os dados de entrada para o cálculo da valoração sejam coletados por órgãos públicos ou que estejam disponíveis para acesso de forma gratuita, estes devem ser utilizados com o objetivo de reduzir os custos e o tempo de elaboração da análise.

3.3.1 Métodos de Valoração da Segurança Viária

A segurança viária é um componente essencial na análise socioeconômica dos sistemas de transporte. A valoração da segurança viária envolve a quantificação dos benefícios econômicos e sociais derivados de melhorias na segurança das estradas, ou da estimativa da redução dos custos atrelados aos sinistros viários. Este processo é vital para a formulação de políticas públicas, alocação de recursos e planejamento de infraestrutura viária.

A valoração da segurança viária pode ser realizada através de diversos métodos que buscam quantificar os impactos associados aos sinistros de trânsito. Os principais métodos são a estimativa de custo por acidentes e o *Willingness to pay* (WTP), traduzido como disposição a pagar.

O primeiro método citado envolve a estimativa dos custos econômicos associados aos acidentes de trânsito. Usualmente, os custos atrelados aos sinistros são calculados por

órgãos públicos, como por exemplo, a Polícia Rodoviária Federal. Desta forma, é possível calcular os custos atrelados à rodovia em estudo com base nos valores estipulados por algum órgão público, conforme o tipo de sinistro ocorrido. A elaboração das estimativas desses custos atrelados aos tipos de acidente leva em consideração diversos fatores, como por exemplo, despesas médicas, danos materiais e custos administrativos. Para calcular a valoração da segurança viária por este método, deve-se estimar a porcentagem de redução do número total de sinistros esperados após a finalização do empreendimento. Esta estimativa da redução do número de sinistros viários pode ser obtida através do cálculo dos riscos aos usuários, que pode ser obtida através da aplicação da metodologia iRAP para os cenários anterior e posterior a implantação do empreendimento. Desta forma, a redução dos custos atrelados aos sinistros se torna um benefício socioeconômico.

O segundo método citado avalia o quanto os usuários estariam dispostos a pagar para reduzir o risco associado aos sinistros viários. A aplicação do método WTP usualmente é realizado através da aplicação de questionários aos usuários. Desta forma, a valoração da segurança viária para o trecho de interesse seria o valor final encontrado através do WTP multiplicado pelo volume de tráfego total.

3.4 VALORAÇÃO DOS IMPACTOS AMBIENTAIS

A valoração dos impactos ambientais, assim como os outros parâmetros apresentados, é um componente importante da análise socioeconômica. A análise dos impactos ambientais de forma monetária permite uma avaliação objetiva das implicações causadas pela implantação de um novo empreendimento. O principal objetivo da valoração dos impactos ambientais é permitir a tomada de decisão em direção a projetos que estimulem o desenvolvimento sustentável.

A valoração dos impactos ambientais é elaborada através da análise de todos os aspectos atrelados a modificação do meio ambiente devido a implantação de um novo empreendimento. A seguir, discutiremos os principais métodos de valoração dos impactos ambientais, os tipos de impactos a serem considerados e a importância dessa valoração na análise socioeconômica. A seguir, o presente item discutirá sobre os principais aspectos e alguns dos dados de entrada necessários para realizar a análise de interesse. Além disso, serão discutidos os principais métodos práticos de valoração dos impactos ambientais. Caso

os dados sobre as características e as propriedades ambientais estejam disponíveis através de portais públicos ou estejam disponíveis para acesso de forma gratuita, estes devem ser utilizados com o objetivo de reduzir os custos e o tempo de elaboração da análise.

3.4.1 Dados e Métodos para a Valoração dos Impactos Ambientais

Os dados básicos para a avaliação dos impactos ambientais e a sua valoração monetária envolvem diversos fatores, e devem ser coletados por profissionais capacitados para tal atividade. De forma geral, os dados necessários envolvem a avaliação dos aspectos físicos mensuráveis, como por exemplo, área de desmatamento, nível da qualidade do ar, contaminação de água etc. Para o caso de túneis rodoviários, podem ser levados em consideração os possíveis benefícios proporcionados pelo empreendimento, como por exemplo, a redução do nível de poluição sonora e possível redução na emissão de gases poluentes pelos veículos.

Para avaliar a magnitude dos impactos ambientais de forma monetária, existem diversos métodos disponíveis, cada um com suas vantagens e limitações. Além disso, o método para realizar a valoração dos impactos ambientais vai ao encontro dos dados disponíveis ao nível de projeto. Entre eles é possível destacar o método de custo de reposição e o WTP. Sobre o método de custo de reposição, este é baseado na avaliação dos recursos financeiros necessários para substituir, restaurar ou mitigar os impactos ambientais negativos sobre os recursos ambientais. Esta avaliação é realizada com base no custo de substituir ou restaurar o recurso afetado. Já o método WTP segue os mesmos parâmetros apresentados para a valoração dos outros itens já apresentados. Ele é calculado com base no valor disposto a ser paga pelos usuários para recuperar ou mitigar os impactos causados pela implantação do novo empreendimento.

Outro método possível para a avaliação dos impactos ambientais é aquele estipulado sobre o custo de implantação do empreendimento. Este método pode ser aplicado quando não há dados disponíveis sobre os aspectos ambientais, principalmente para as fases preliminares de projeto. Desta forma, é necessário que seja calculada a valoração dos impactos ambientais em relação ao valor total do projeto.

3.5 ESTIMATIVA DE CUSTOS

O presente item apresentará os principais aspectos de entrada necessários para realizar a estimativa de custos de um empreendimento de túnel rodoviário. Além disso, serão discutidos os principais métodos práticos de obtenção de dados.

3.5.1 *Capex*

O *Capex* pode ser definido como os custos atrelados aos processos necessários para realizar a implantação de um novo empreendimento. Desta forma, quanto maior for o detalhamento do projeto, maior será a confiabilidade na estimativa dos custos totais de implantação. O *Capex* também pode ser obtido de forma indireta através da estimativa de custos baseada em empreendimentos já concebidos de porte e características semelhantes àquele que se deseja avaliar.

3.5.2 *Opex*

O *Opex* pode ser definido como os recursos financeiros necessários para realizar todas as atividades operacionais de um empreendimento. Portanto, são custos atrelados após a finalização da fase de implantação do túnel até o fim do seu ciclo de vida. A estimativa do *Opex* é mais complexa do que o *Capex* devido à imprevistos e intercorrências que podem ocorrer em todo o ciclo de vida do túnel.

Uma forma de realizar a mensuração do *Opex* é através da estimativa dos recursos que serão necessários para manter o funcionamento operacional do túnel. Nestes custos podem estar incluídos os serviços de reparos e substituição de materiais e dispositivos que constituem todos os sistemas do túnel. Além disso, pode ser incluído na estimativa os recursos necessários para realizar a contratação da mão de obra especializada para realizar os serviços operacionais. Outro método possível para estimar o *Opex* é através da avaliação dos editais de licitação públicos que estipulam os valores disponíveis para a realização da operação de túneis durante um determinado período.

3.6 ANÁLISE SOCIOECONÔMICA

A última etapa do método proposto refere-se à análise socioeconômica do empreendimento. Essa análise levará em consideração todos os aspectos apresentados anteriormente. Todos os impactos do empreendimento levados em consideração e seus respectivos valores monetários devem ser calculados para o valor presente. Desta forma, os impactos negativos avaliados devem ser considerados como custos do projeto e os impactos positivos, como benefícios.

Nesta etapa devem ser calculados todos os fatores estipulados no Capítulo 2 com relação à análise socioeconômica do presente estudo, como por exemplo a Taxa Econômica de Retorno (TER) e a relação benefício/custo. Caso os fatores calculados apresentem um valor monetário positivo, ou seja, a somatória dos benefícios é superior a todos os impactos negativos, então o empreendimento pode ser considerado viável do ponto de vista socioeconômico. Caso contrário, se a somatória de todos os fatores for negativa, ou seja, os impactos negativos forem maiores do que os benefícios proporcionados pelo túnel, então o empreendimento pode ser descrito como inviável sobre a ótica da análise socioeconômica.

4 ESTUDO DE CASO

Neste capítulo será apresentado um estudo de caso com a aplicação do método proposto. Também serão apresentados todos os dados usados na modelagem do problema e suas fontes. Para os dados obtidos em campo, serão descritos todos os processos e tomadas de decisão. A análise socioeconômica realizada foi limitada para os próximos 20 anos.

4.1 COLETA DE DADOS

Os dados necessários para compor as etapas subsequentes trata-se principalmente do Tráfego Médio Diário, número de sinistros viários ocorridos, características físicas da via existente, como também do túnel. Esses dados foram coletados através de pesquisa bibliográfica, requisição junto a órgãos públicos e coleta em campo.

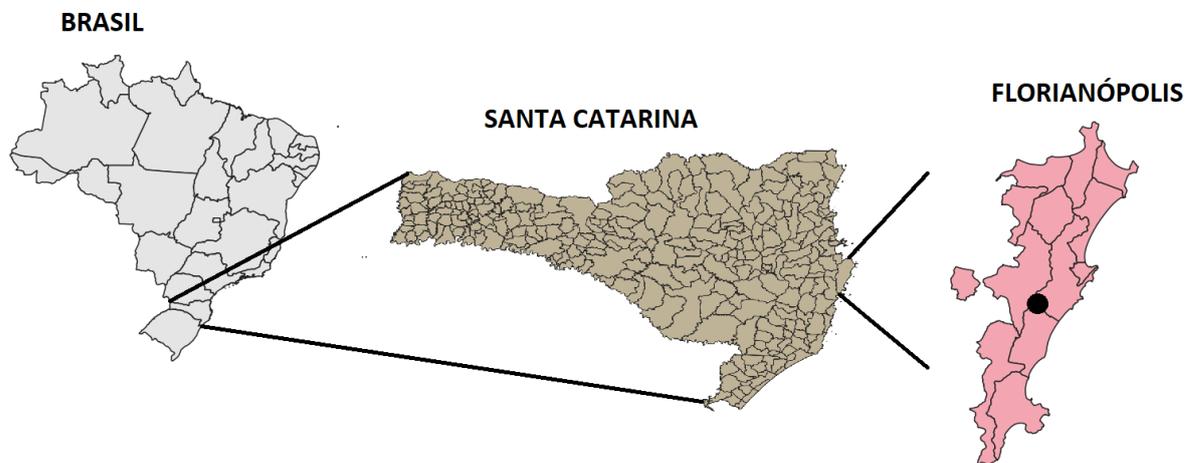
Além da coleta de dados em campo sobre os parâmetros de tráfego e estrutura da via, foi realizada uma entrevista com representantes da população local. Para exercer essa atividade, foi realizado junto à AmoLagoa (Associação de Moradores da Lagoa da Conceição) uma entrevista para compreender as indagações e principais solicitações dos moradores locais.

4.1.1 Área de Estudo

A primeira etapa do método trata-se na definição da área de estudo. A área de interesse do presente estudo encontra-se na cidade de Florianópolis. A proposta de um túnel rodoviário para a cidade situa-se no Maciço do Morro da Lagoa da Conceição. Atualmente o local apresenta uma rodovia estadual (SC-404), a qual apresenta características de pista simples em âmbito de greide montanhoso. O trecho da rodovia que passa pelo maciço apresenta extensão de aproximadamente 3 km.

O maciço de interesse possui um relevo em formato de sela e inclinações variáveis. Sua altitude total é de aproximadamente 280 metros. No cume do morro, encontram-se atividades de lazer como um mirante e pontos de salto de asa-delta. Ao redor do maciço (sopé) encontram-se loteamentos residenciais e pontos comerciais. A Figura 16 apresenta a localização da área de interesse.

Figura 16 – Localização da área de interesse



Fonte: Autor (2023)

4.1.2 Entrevista com AMOLAGOA

Para identificar os principais questionamentos e reivindicações por parte dos moradores do bairro da Lagoa da Conceição, foi elaborada uma entrevista com um dos representantes da associação AMOLAGOA. A entrevista foi concedida por um dos diretores da associação, que demonstrou interesse pela presente pesquisa. Os principais questionamentos feitos ao entrevistado foram com relação a situação atual do sistema de transporte na região e sobre as perspectivas sobre o possível túnel no Morro da Lagoa.

Sobre o sistema de transporte no bairro, o entrevistado afirma que a maior parte dele é praticado através de automóveis. Encontra-se disponível no bairro um terminal de ônibus, em que é possível escolher um itinerário para qualquer ponto da cidade. Segundo o entrevistado, a qualidade do transporte público é ruim devido principalmente o tempo de defasagem entre as linhas de ônibus e ao baixo conforto ao usuário. Não há a disponibilidade de linhas de BRT devido à incompatibilidade estrutural viária. A matriz rodoviária é composta majoritariamente de automóveis. São realizados deslocamentos particulares no modo hidroviário, sem a presença de linhas comerciais para a população. Também é comum o fluxo de ciclistas que realizam o trajeto até o bairro pelo Morro da Lagoa.

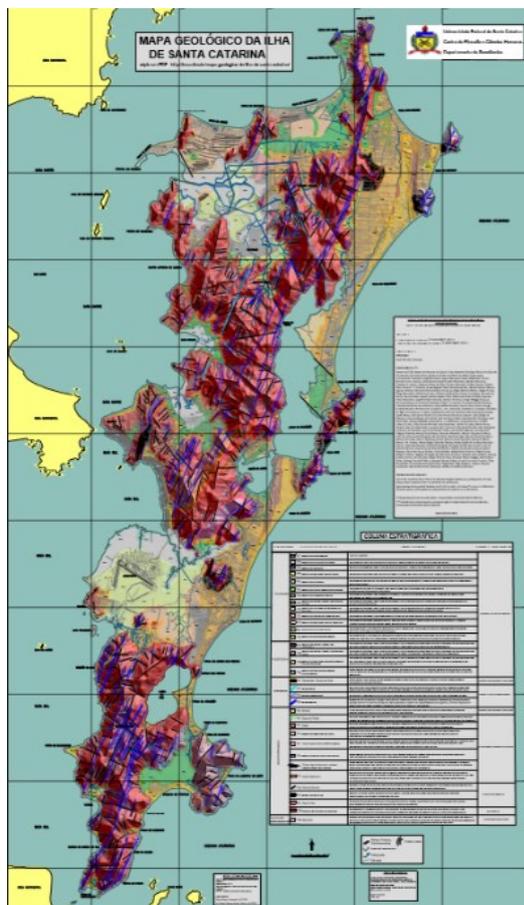
Com relação ao projeto do túnel, o entrevistado afirma que a associação não foi procurada pela prefeitura para avaliar o interesse dos moradores. Também não foi apresentado estudo econômico prévio para os moradores. Da mesma maneira, nenhuma audiência pública foi realizada. A principal dúvida dos moradores é em relação à efetividade da obra perante os problemas de congestionamentos frequentes no bairro.

Ao abordar sobre os benefícios do empreendimento na entrevista, o representante da associação achou interessante o debate sobre a valoração para cada uma delas. Afirmou também que acredita que o tempo de viagem seja o benefício de maior interesse para a comunidade, em consequência de problemas de tráfego. O entrevistado afirmou que em épocas de veraneio o trânsito piora muito no local, principalmente para acessar o bairro. Geralmente, o tempo total de viagem é dobrado para essa época do ano. Sobre os sinistros rodoviários, o entrevistado afirmou que não são comuns sinistros com alta severidade.

4.1.3 Geologia

A área de interesse apresenta uma geologia propícia para a realização de obras de infraestrutura subterrânea. Segundo o mapa geológico da Ilha de Florianópolis, apresentado na Figura 17, o local possui composição rochosa de Granito Ilha e Granito Itacorubi. Além disso, dique de diabásio são característicos da região. Sobre os lineamentos (fraturas) que possam ser encontradas durante a escavação, é possível constatar que, em sua maioria, possuem orientação (direção) nordeste, entre 10 e 50 graus.

Figura 17 - Mapa geológico da Ilha de Florianópolis



Fonte: Tomazzoli (2014)

Para efeitos de comparação, o único túnel rodoviário de Florianópolis em operação, apresenta características geológicas semelhantes ao do Maciço do Morro da Lagoa da Conceição. Entretanto, apresenta um número maior de fraturas e diques, o que indica a executabilidade de um novo túnel no local de interesse.

Segundo Almeida (2001), a Ilha de Florianópolis possui características geológicas que lhe conferem a grande capacidade de utilização de espaços subterrâneos. Um dos pontos citados pela autora, trata-se justamente do Morro da Lagoa da Conceição. Ademais, em sua tese de doutorado, Almeida (2001) apresenta alternativas para o uso subterrâneo para este local como túneis rodoviários e galerias para tratamento de esgoto.

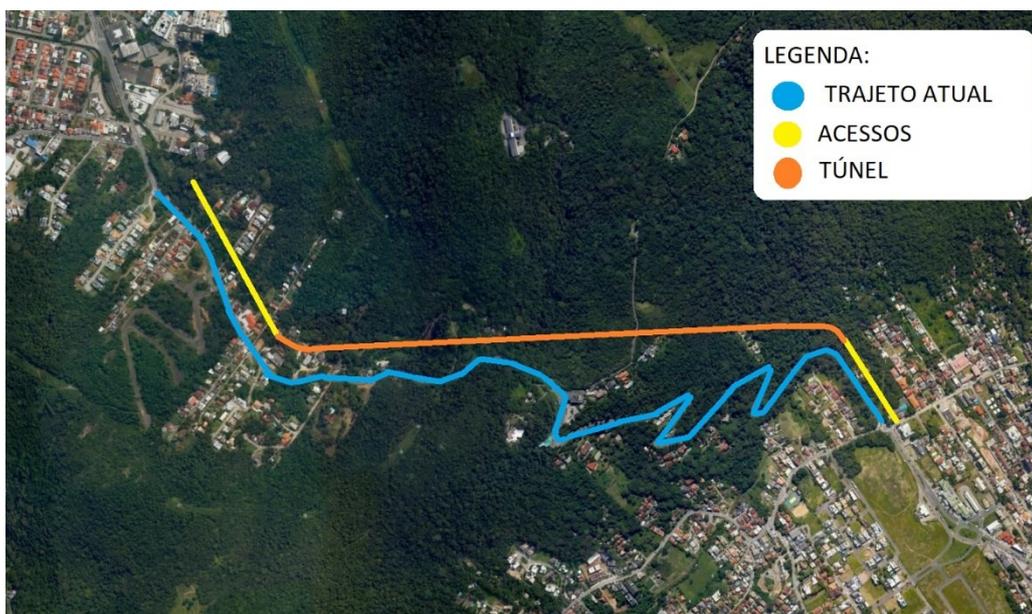
4.1.4 Projeto do Túnel

Apesar de ainda não possuir um projeto executivo finalizado, a Prefeitura Municipal de Florianópolis exigiu em seu contrato de licitação, denominado PREGÃO PRESENCIAL N.º 516/SMA/DSL/2021, que o traçado do túnel seja limitado entre as ruas Vera Linhares de Andrade e Laurindo Januário da Silveira. Desta forma, a extensão aproximada do túnel seria de 1.300 metros, com acessos de até 1.160 metros.

O túnel apresentaria largura total de 16,20 metros. Ao todo, a seção transversal do túnel possuiria duas faixas de rolamento (com largura de 3,5 metros cada uma), acostamento de 3 metros, ciclovia com 2,5 metros e um passeio de 2,5 metros.

No edital citado, não foi apresentado traçado prévio. Entretanto, há a expectativa de que o traçado final tangencie o projeto geométrico da rodovia existente. A Figura 18 apresenta uma possibilidade de traçado a ser adotado no projeto em questão.

Figura 18 – Possível traçado final para o túnel



Fonte: Autor (2023)

4.1.5 Dados de Tráfego

Os dados de tráfego para a área de estudo foram obtidos através dos relatórios elaborados pela Secretaria de Estado da Infraestrutura e Mobilidade (SIE) (Santa Catarina,

2023). Neste relatório são apresentados dados sobre o Sistema Rodoviário Estadual (SRE). Entre eles encontram-se o Tráfego Médio Diário (TMD).

Ao receber esses dados da SIE, foi informado que os dados disponibilizados foram coletados em campo em 2013, para a SC-404, e que a partir disso, foram realizadas projeções. Para o ano de 2023, foi projetado um TMD de 39.997, somente para o trecho da SC-404 que está entre o início do Morro da Lagoa da Conceição e a SC-401. Para caracterizar o tráfego local, foi realizada uma filmagem do trecho de interesse. A partir dessa filmagem, foi obtido o volume percentual de cada tipo de veículo.

Para definir o tempo de viagem, foram realizadas viagens no trecho de interesse com a utilização de um cronômetro. Ao todo foram realizadas 10 viagens (5 em cada sentido), para verificar a possível flutuação do tempo de viagem para cada sentido. Foi verificado que o tempo de viagem entre os dois sentidos não apresentou diferença significativa. O tempo de viagem foi calculado com base na média entre as viagens realizadas. A Figura 19 apresenta uma parte da filmagem realizada em uma das viagens no trecho avaliado. Ao analisar a imagem é possível verificar algumas das características da via, como por exemplo, a sua elevação e curvatura acentuada.

Figura 19 – Caracterização da via analisada



Fonte: Autor (2024)

Além disso, o tempo de viagem também foi obtido através de simulações de tráfego, utilizando como base as características do trecho da rodovia analisada e o volume de tráfego

indicado pela SIE-SC. As simulações de tráfego foram realizadas através do *software InfraWorks*, obtido através de licença gratuita para estudantes. Também através das simulações de tráfego foram obtidos os tempos de viagem após a construção do túnel. A composição do tráfego após a construção do túnel foi definida com base no volume inicial para o trecho. O tráfego estimado para o túnel foi de 90% do valor total. Os 10% restantes foram mantidos para a rodovia existente.

Para definir a progressão do volume de tráfego pelos anos de avaliação, foi utilizada uma taxa de crescimento de 2,5%. Essa taxa foi definida com base no valor de crescimento médio definido pelo IBGE em seu Censo 2023 (IBGE, 2023). Da mesma forma, o tempo de viagem calculado levou em consideração este aumento no volume de tráfego anual.

4.1.6 Sinistros Rodoviários

Os dados utilizados no presente estudo para analisar a segurança viária local foram obtidos através do Relatório Estatístico do Comando de Polícia Militar Rodoviária de Santa Catarina (Santa Catarina, 2024). Os dados usados compreendem os sinistros datados de 2017 até 2023, ocorridos na SC-404, limitados apenas para o trecho de interesse. Os valores podem ser verificados através da Tabela 7.

Tabela 7 – Sinistros rodoviários na SC-404

Ano	Sinistros	Feridos leves	Feridos Graves	Óbitos
2017	41	11	4	0
2018	34	10	4	0
2019	46	25	1	0
2020	29	6	1	0
2021	37	13	5	0
2022	33	8	3	0
2023	30	9	4	0
Média	36	12	3	0

Fonte: Autor (2024)

4.2 VALORAÇÃO DO TEMPO DE VIAGEM

A valoração do tempo de viagem foi calculada a partir da diferença do tempo despendido para transpassar o Morro da Lagoa da Conceição pelo caminho atual e o possível

túnel. Para realizar a estimativa deste parâmetro, foram utilizados como base o volume de tráfego divulgado, o tempo de viagem obtido através das simulações de tráfego e o valor de tempo. A Tabela 8 apresenta o tempo de viagem e o volume de tráfego calculado para cada ano de análise.

Tabela 8 – Tempo de viagem para cada ano de análise

Ano	Tempo de Viagem S/ Túnel	Tempo de Viagem C/ Túnel	Número de viagens diárias
1	05:42	01:30	40000
2	04:34	01:43	41000
3	05:13	01:39	42025
4	05:26	01:38	43076
5	05:23	01:44	44153
6	05:29	01:46	45256
7	06:23	01:43	46388
8	06:19	01:48	47547
9	06:40	01:50	48736
10	06:30	01:49	49955
11	06:45	01:51	51203
12	06:25	01:54	52483
13	06:42	01:59	53796
14	06:35	01:57	55140
15	06:29	02:01	56519
16	06:38	02:05	57932
17	06:48	02:15	59380
18	06:50	02:18	60865
19	07:00	02:17	62386
20	07:10	02:23	63946

Fonte: Autor (2024)

O valor do tempo foi definido através do método do valor médio salarial. A média salarial para a população de Florianópolis é de 4,5 salários-mínimos, como definido pelo Censo 2023 (IBGE, 2023). Desta forma, o valor horário médio, ao levar em consideração 220 horas de trabalho mensal, resultou em aproximadamente R\$ 30/hora. Este valor foi dividido por 60 para definir o valor do tempo por minuto. Desta forma, o valor do tempo foi definido em R\$ 0,50/min.

A valoração do tempo de viagem foi calculada para cada ano. Desta forma foram definidos o custo de tempo dispendido para realizar o trajeto para a situação sem o túnel e outra com o túnel. Os custos foram calculados anualmente, considerando o tempo de viagem obtido através das simulações e o volume de tráfego atualizado conforme a taxa de crescimento. Por tanto, a valoração do tempo de viagem para cada ano é o resultado da diferença de custo entre a situação atual sem túnel e com a construção do túnel. A Tabela 9 apresenta o resultado da valoração do tempo de viagem para cada ano.

Tabela 9 – Valoração do tempo de viagem anual

Custo por minuto	Custo tempo de viagem sem túnel	Custo tempo de viagem com túnel	Valoração tempo de viagem
R\$ 0,50	R\$ 41.040.000,00	R\$ 10.800.000,00	R\$ 30.240.000,00
R\$ 0,50	R\$ 33.702.000,00	R\$ 12.669.000,00	R\$ 21.033.000,00
R\$ 0,50	R\$ 39.461.475,00	R\$ 12.481.425,00	R\$ 26.980.050,00
R\$ 0,50	R\$ 42.127.961,25	R\$ 12.664.233,75	R\$ 29.463.727,50
R\$ 0,50	R\$ 42.783.787,64	R\$ 13.775.584,88	R\$ 29.008.202,77
R\$ 0,50	R\$ 44.667.996,24	R\$ 14.391.512,47	R\$ 30.276.483,78
R\$ 0,50	R\$ 53.299.509,50	R\$ 14.333.810,65	R\$ 38.965.698,85
R\$ 0,50	R\$ 54.061.428,08	R\$ 15.405.367,37	R\$ 38.656.060,71
R\$ 0,50	R\$ 58.483.339,08	R\$ 16.082.918,25	R\$ 42.400.420,83
R\$ 0,50	R\$ 58.446.786,99	R\$ 16.335.127,65	R\$ 42.111.659,35
R\$ 0,50	R\$ 62.212.108,85	R\$ 17.050.726,13	R\$ 45.161.382,72
R\$ 0,50	R\$ 60.618.403,59	R\$ 17.949.345,48	R\$ 42.669.058,11
R\$ 0,50	R\$ 64.877.436,88	R\$ 19.205.012,41	R\$ 45.672.424,47
R\$ 0,50	R\$ 65.341.423,53	R\$ 19.354.295,07	R\$ 45.987.128,46
R\$ 0,50	R\$ 65.957.617,96	R\$ 20.516.379,88	R\$ 45.441.238,08
R\$ 0,50	R\$ 69.296.722,37	R\$ 21.724.472,50	R\$ 47.572.249,87
R\$ 0,50	R\$ 72.804.868,94	R\$ 24.048.991,05	R\$ 48.755.877,89
R\$ 0,50	R\$ 74.863.618,45	R\$ 25.197.998,41	R\$ 49.665.620,04
R\$ 0,50	R\$ 78.653.589,13	R\$ 25.640.789,32	R\$ 53.012.799,81
R\$ 0,50	R\$ 82.635.427,08	R\$ 27.432.837,19	R\$ 55.202.589,90

Fonte: Autor (2024)

4.3 VALORAÇÃO DA SEGURANÇA VIÁRIA

No âmbito da segurança viária, a valoração foi calculada conforme a redução do número de sinistros esperado para o cenário com o túnel. Para realizar esta estimativa de redução de sinistros, foi aplicada a metodologia *iRAP* para o trecho atual da rodovia SC-404, assim como para o projeto do túnel. O método foi selecionado devido a sua capacidade de calcular uma pontuação de risco aos usuários com base na codificação dos elementos viários.

A aplicação da metodologia *iRAP* foi realizada através do software *STARS*, desenvolvido pelo LabTrans (Laboratório de Transportes de Logística) da Universidade Federal de Santa Catarina. A análise da rodovia foi realizada através de imagens registradas em campo a partir de uma filmagem. Essa filmagem foi submetida ao *software*, e então foi realizada a codificação do trecho da rodovia. Finalizado o processo de codificação, o resultado foi submetido ao *software-web* ViDA, em que foi gerada a Classificação por Estrelas e a pontuação de risco, do inglês *Star Rating Score* (SRS). A Figura 20 demonstra o resultado da Classificação por Estrelas para o trecho da SC-404 para cada tipo de usuário.

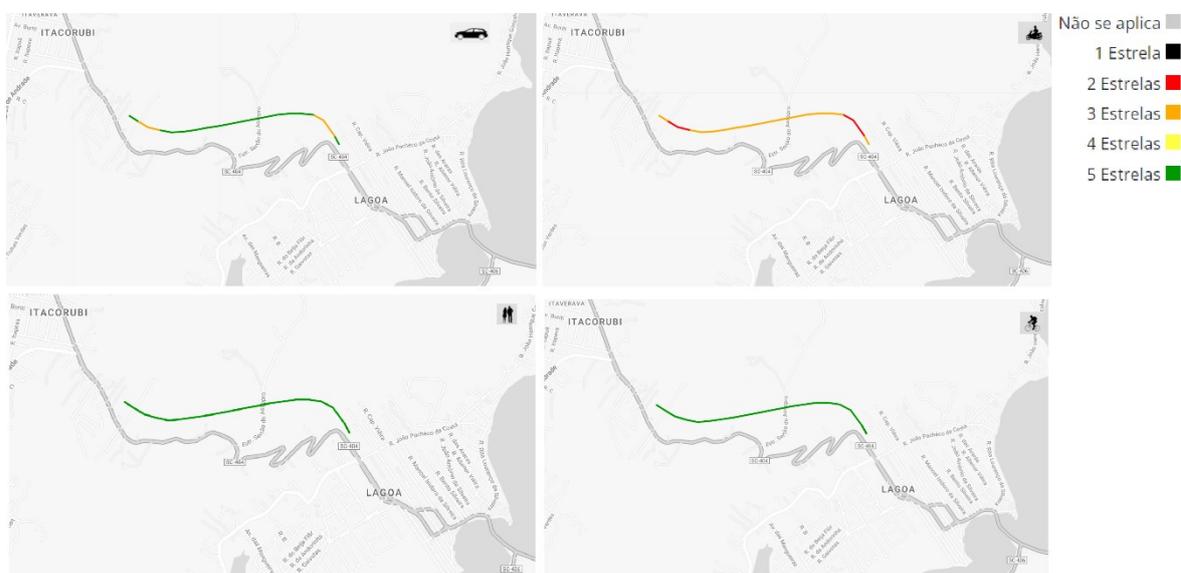
Figura 20 – Classificação por estrelas para o trecho da rodovia SC-404



Fonte: Autor (2024)

Para realizar a aplicação da metodologia iRAP para o túnel, foi necessário realizar a modelagem do projeto no *software Infraworks*. A partir dessa modelagem foi possível avaliar os elementos viários e as características do projeto de forma facilitada. O processo de codificação para a obtenção da Classificação por Estrelas e a pontuação de risco foi o mesmo utilizado para a avaliação do trecho da SC-404. A Figura 21 apresenta o resultado da Classificação por Estrelas do projeto do túnel.

Figura 21 – Classificação por Estrelas para o trajeto do túnel



Fonte: Autor (2024)

Após a aplicação da metodologia iRAP, foi obtida a pontuação de risco para cada um dos cenários. A partir da pontuação de risco, foi estimada a redução do número de sinistros. A redução da pontuação de risco entre os dois cenários foi calculada em um média de 88%. A Tabela 10 apresenta os valores da pontuação de risco suavizada para cada um dos cenários.

Tabela 10 – Pontuação de risco

Cenário	Pontuação de risco média			
	Carro	Mociclista	Ciclista	Pedestre
Atual	20,24	28,14	158,01	220,09
Com túnel	2,73	9,38	0,02	0,00
Redução percentual	87%	67%	100%	100%
Redução média	88%			

Fonte: Autor (2024)

A valoração da segurança viário foi calculada a partir da projeção da redução do número de sinistros para os anos de análise. A projeção foi realizada com base na redução da pontuação de risco entre os dois cenários. Para compor a valoração da segurança viária, foi utilizado um valor médio para os custos por sinistros. O valor médio para o custo por sinistros foi adotado com base nos dados disponibilizados pela CNT (Confederação Nacional do Transporte) em seu Painel de Acidentes Rodoviários (CNT, 2023). O valor médio adotado foi de, aproximadamente, 200 mil reais para cada sinistro. A Tabela 11 apresenta o resultado da valoração da segurança viária.

Tabela 11 – Valoração da segurança viária

Ano	Sinistros sem tunel	Custo anual	Sinistros com túnel	Custo anual	Valoração segurança viária
1	36	R\$ 7.517.516,52	4	R\$ 902.101,98	R\$ 6.615.414,54
2	37	R\$ 7.705.454,43	4	R\$ 924.654,53	R\$ 6.780.799,90
3	38	R\$ 7.898.090,79	5	R\$ 947.770,90	R\$ 6.950.319,90
4	39	R\$ 8.095.543,06	5	R\$ 971.465,17	R\$ 7.124.077,89
5	40	R\$ 8.297.931,64	5	R\$ 995.751,80	R\$ 7.302.179,84
6	41	R\$ 8.505.379,93	5	R\$ 1.020.645,59	R\$ 7.484.734,34
7	42	R\$ 8.718.014,43	5	R\$ 1.046.161,73	R\$ 7.671.852,70
8	43	R\$ 8.935.964,79	5	R\$ 1.072.315,77	R\$ 7.863.649,01
9	44	R\$ 9.159.363,91	5	R\$ 1.099.123,67	R\$ 8.060.240,24
10	45	R\$ 9.388.348,01	5	R\$ 1.126.601,76	R\$ 8.261.746,25
11	46	R\$ 9.623.056,71	6	R\$ 1.154.766,80	R\$ 8.468.289,90
12	47	R\$ 9.863.633,12	6	R\$ 1.183.635,97	R\$ 8.679.997,15
13	48	R\$ 10.110.223,95	6	R\$ 1.213.226,87	R\$ 8.896.997,08
14	50	R\$ 10.362.979,55	6	R\$ 1.243.557,55	R\$ 9.119.422,00
15	51	R\$ 10.622.054,04	6	R\$ 1.274.646,48	R\$ 9.347.407,55
16	52	R\$ 10.887.605,39	6	R\$ 1.306.512,65	R\$ 9.581.092,74
17	53	R\$ 11.159.795,53	6	R\$ 1.339.175,46	R\$ 9.820.620,06
18	55	R\$ 11.438.790,41	7	R\$ 1.372.654,85	R\$ 10.066.135,56
19	56	R\$ 11.724.760,17	7	R\$ 1.406.971,22	R\$ 10.317.788,95
20	58	R\$ 12.017.879,18	7	R\$ 1.442.145,50	R\$ 10.575.733,68

Fonte: Autor (2024)

4.4 VALORAÇÃO DOS IMPACTOS AMBIENTAIS

Devido às limitações da disponibilidade de dados sobre os aspectos ambientais para a área de estudo, a valoração dos impactos ambientais foi definida, para o presente estudo de caso, como um custo percentual em relação ao *Capex*. Conforme definido pelo DNIT, em seu Custos Médios Gerenciais (Brasil, 2011), a valoração dos impactos ambientais é definida como 5,25% do custo anual de implantação. Devido a estas limitações não foram levadas em considerações os possíveis impactos positivos ambientais do projeto, que seriam relacionados a redução da emissão de gases poluentes e redução do nível de poluição sonora, por exemplo.

4.5 ESTIMATIVA DE CUSTOS

Nesta etapa do estudo de caso, foram realizadas as estimativas dos custos envolvidos no projeto. Por se tratar de uma análise ex-ante, sem contar com um projeto

executivo definitivo, os custos CAPEX e OPEX foram definidos com base nos valores encontrados na literatura e praticados em obras previamente executadas em solo brasileiro.

4.5.1 Capex

A estimativa dos custos de implantação para o estudo de caso foi elaborada através da atualização do custo total gerado para a implantação do Túnel do Morro do Formigão. O túnel em questão foi construído em Santa Catarina, com o início das obras em 2013. Os valores de custos apresentados no edital foram atualizados para o ano corrente de 2023, através do índice IPCA. O valor atualizado foi dividido pela extensão final do túnel para verificar o valor por metro. A Tabela 12 apresenta os valores mencionados.

Tabela 12 – Custos de implantação para o Túnel do Morro do Formigão

Túnel	Extensão (m)	Custo total em 2013	Valor atualizado	Custo por metro
Túnel Morro do Formigão	900	R\$ 65.165.513,26	R\$ 140.274.951,50	R\$ 155.861,06

Fonte: Autor (2024)

A partir do valor obtido do custo por metro, foi calculado o *Capex* esperado para o túnel do estudo de caso. O projeto do túnel possui uma extensão aproximada de 1.300 metros. Multiplicando o valor da extensão do túnel pelo custo/metro definido, o *Capex* esperado para o Túnel do Morro da Lagoa da Conceição seria de R\$ 202.619.374,39 para cada uma das galerias. Se o projeto adotado for escavado em duas galerias, então o *Capex* seria de R\$ 405.238.748,78. Outra forma possível de realizar a estimativa do valor esperado para o *Capex* seria através do cálculo do volume escavado. A definição do volume escavado leva em consideração, além da extensão do túnel, a seção transversal típica do túnel. Para o presente estudo de caso foi levado em consideração apenas a extensão devido a falta de informações do projeto do túnel.

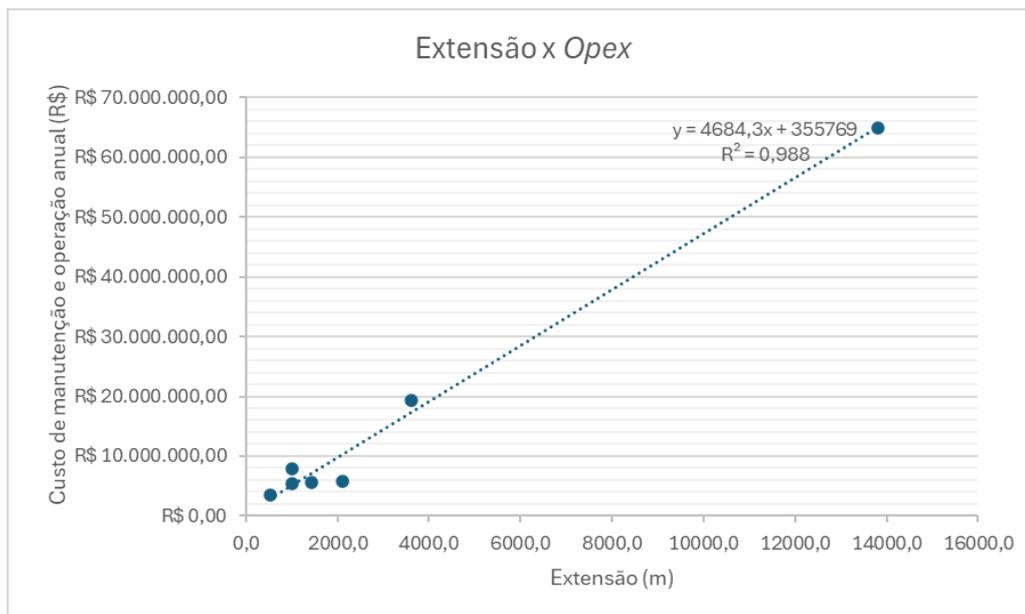
Devido às incertezas envolvendo a estimativa de custos de implantação para o Túnel do Morro da Lagoa, foram desenvolvidos três cenários possíveis. O primeiro cenário corresponde ao mais otimista, com um *Capex* estimado em 300 milhões de reais. O segundo cenário levou em consideração um custo total de implantação de 350 milhões de reais. Já o terceiro cenário foi o mais pessimista, qual foi adotado o valor de 400 milhões de reais. Os cenários também foram criados com o objetivo de realizar uma análise de risco simples, a

fim de verificar o resultado da análise socioeconômica para os três cenários. Desta forma, seria possível identificar possivelmente um valor máximo para o empreendimento, caso ele seja definido como inviável em algum dos cenários.

4.5.2 *Opex*

Sobre os custos de operação e manutenção, foram utilizados dados disponibilizados por editais públicos de licitação para contratos de manutenção e operação de túneis rodoviários situados em vias federais e atrelados ao gerenciamento do DNIT. A partir desses contratos, foi calculada uma regressão linear simples. Para definir a regressão, os valores de entrada foram os custos apresentados nos editais e as extensões dos túneis envolvidos. Todos os valores de custos apresentados nos editais foram atualizados para o ano corrente de 2023, através do índice IPCA. A regressão é apresentada pela Figura 22.

Figura 22 – Regressão linear para estimar o *Opex*



Fonte: Autor (2024)

Com base no resultado da regressão linear, foi possível estimar o *Opex* para o túnel do Morro da Lagoa da Conceição com base na sua extensão (2600 m para duas galerias). Ao utilizar a equação da regressão linear, o custo anual para operação e manutenção do túnel ficou em torno de 12 milhões de reais.

4.6 RELAÇÃO BENEFÍCIO/CUSTO

A estimativa da relação benefício/custo para o estudo de caso envolveu todos os fatores calculados anteriormente. Sobre os impactos diretos avaliados, a valoração do tempo de viagem e da segurança viária apresentaram valores positivos. Desta forma, foram considerados como impactos diretos positivos. Com relação aos impactos ambientais, devido às limitações, foram considerados apenas os impactos negativos. Portanto, a valoração dos impactos ambientais foi definida como custos incorporados aos valores estimados para o *Capex*.

A somatória monetária dos benefícios calculados para o projeto durante os 20 anos de análise foram de aproximadamente 900 milhões de reais. Já os valores calculados para os custos, variaram conforme o valor de *Capex* para cada um dos cenários. Para o cenário otimista, os custos calculados foram de 567 milhões de reais. Para o cenário intermediário, os custos estimados foram de 619 milhões de reais. Por fim, para o cenário mais pessimista, o somatório dos custos atingiu um valor aproximado de 672 milhões de reais.

Ao analisar o valor obtido dos benefícios e os custos calculados para cada um dos cenários, fica explícito que a relação benefício/custo é positiva. Por tanto, do ponto de vista social, a obra do Túnel do Morro da Lagoa da Conceição pode ser considerada como benéfica. Entretanto, como o valor da relação ficou próximo de 1, é necessário que sejam feitos os cálculos da avaliação socioeconômica utilizando as fórmulas apresentadas no Capítulo 2.

4.7 ANÁLISE SÓCIOECONÔMICA

A partir dos benefícios e dos custos calculados, foi elaborada a análise socioeconômica ex-ante para o Túnel do Morro da Lagoa da Conceição. Para elaborar a análise foi considerada uma Taxa de Retorno Social de 8,5% ao ano. A partir dessa taxa, foi calculado o Valor Social Presente Líquido (VSPL). Para todos os cenários avaliados, o VSPL foi negativo. Isto significa que, para o valor presente, os valores dos benefícios calculados não foram superiores aos custos estimados.

Outro índice avaliado foi o *payback*. O *payback* possui o intuito de avaliar o período necessário para que o valor investido em um empreendimento seja abatido pelos benefícios

proporcionados por ele. Para todos os cenários foram calculados o payback simples e o payback descontado. O payback descontado leva em consideração a taxa de retorno definida, que para o estudo de caso, foi 8,5%. Para o payback simples, para todos os cenários foi possível obter o valor calculado para os custos dentro do período de análise. Entretanto, ao levar em consideração a taxa de desconto, em nenhum dos cenários o payback foi menor do que o período de análise.

A partir dos índices avaliados é possível confirmar que, do ponto de vista econômico, a proposta de projeto para o Túnel do Morro da Lagoa da Conceição é considerada inviável. Vale pontuar que o período de análise foi limitado em 20 anos. Possivelmente, se a análise fosse ampliada para 50 anos, os valores calculados se tornariam positivos. Os valores calculados para a análise socioeconômica encontram-se apresentados pela Tabela 13.

Tabela 13 – Cálculo da análise socioeconômica

Índices	Cenário Otimista	Cenário Intermediário	Cenário Pessimista
Benefícios	R\$ 977.264.172,44	R\$ 977.264.172,44	R\$ 977.264.172,44
Custos	-R\$ 566.448.980,00	-R\$ 619.073.980,00	-R\$ 671.698.980,00
Relação Benefício/Custo	1,73	1,58	1,45
PayBack Simples	15 anos	16 anos	19 anos
PayBack Descontado	> 20 anos	> 20 anos	> 20 anos
VSPL	-R\$ 26.253.085,67	-R\$ 68.595.515,65	-R\$ 142.286.289,43
TSD	8,5%	8,5%	8,5%
TER	7,0%	6,0%	3,0%

Fonte: Autor (2024)

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Devido à evolução e crescimento dos centros urbanos, a eficiência dos sistemas de transportes urbanos se torna cada vez mais necessária. Atualmente, a mobilidade urbana das grandes cidades brasileira é discutida e estudada em busca de soluções que atendam as demandas sociais de maneira eficiente, do ponto de vista econômico e social.

Atualmente na literatura brasileira estudos sobre tomada de decisão sobre obras de infraestrutura estão em desenvolvimento. Em 2021 o Ministério da Economia lançou o Guia Geral de Análise Socioeconômica de Custo-Benefício de Projetos de Investimento em Infraestrutura. Este guia apresenta alguns parâmetros básicos para a avaliação de projetos de infraestrutura. Entretanto, não define métodos de cálculo específicos para cada tipo de obra. Devido a esta lacuna, surgiu a definição do tema do presente estudo.

O principal objetivo do presente estudo foi definido em apresentar um método simplificado para que fosse possível averiguar a viabilidade socioeconômica de empreendimentos de túneis rodoviários. Ao decorrer desta dissertação foram apresentadas as etapas necessárias para a elaboração de uma análise socioeconômica ex-ante de túneis rodoviários. Todas as etapas foram explanadas ao apresentar os dados básicos necessários e alguns métodos de cálculos possíveis para estimar a valoração dos impactos diretos levados em consideração no início deste trabalho. Ao analisar os objetivos específicos sugeridos no início do trabalho, é possível verificar que todos foram elucidados ao decorrer da dissertação.

Sobre o estudo de caso elaborado, foi possível verificar a exequibilidade do método proposto. Em alguns pontos, devido a algumas limitações de acesso aos dados necessários para compor o estudo, foi necessário realizar a simplificação de alguns dos cálculos elaborados. Entretanto, as simplificações apresentadas não invalidam o método sugerido. Também foi possível constatar a inviabilidade do empreendimento, levando em consideração os fatores estipulados no estudo. Ao término do presente estudo, foi possível elaborar uma análise que pode ser utilizada para instruir a população e os gestores da cidade de Florianópolis.

6 PROPOSTA DE TEMAS PARA NOVOS ESTUDOS

Ao término do presente estudo foi possível identificar algumas lacunas que podem ser selecionadas como tema para estudos futuros. A seguir encontram-se alguns temas possíveis que podem complementar a dissertação elaborada ou criar soluções para os problemas que envolvem a mobilidade urbana das cidades brasileiras:

- a) Método para avaliação socioeconômica para aperfeiçoar a estimativa da valoração do tempo de viagem, levando em consideração o transporte coletivo;
- b) Avaliação de impactos ambientais devido a construção de túneis rodoviários (positivos e negativos);
- c) Avaliação do tráfego da macrorregião de Florianópolis incluindo a proposta do túnel rodoviário para a Lagoa da Conceição, levando em consideração o aumento do fluxo de veículos em épocas de veraneio;

Referências

ALMEIDA, E. S. **Utilização subterrânea dos maciços rochosos: uma alternativa de preservação ambiental na Ilha de Santa Catarina**. 191 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, 2001.

ARDESHANA, A. *et al.* **Tunnels And Tunneling Operations: Introduction to Old and New Era**. 2016.

ASSOCIATION INTERNATIONALE DES TUNNELS ET DE L'ESPACE SOUTERRAIN. **ITA. Immersed Tunnels in the Natural Environment: An information paper produced by the International Tunnelling and Underground Space Association Working Group 11 for Immersed and Floating Tunnels**. 2017.

AUSTRÁLIA. AUSTRALIAN TRANSPORT ASSESSMENT PLANNING. **T2 Cost Benefit Analysis**. 1. ed. 2018.

AUSTRÁLIA. TREASURY. **Policy and Guidelines Paper NSW Government Guide to Cost-Benefit Analysis**. 2017. Disponível em: www.treasury.nsw.gov.au/.

BARRETO, C. B. M. **Método para concepção e gestão de sistemas de controle de velocidade em redes viárias**. Tese (Doutorado), 2015. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/158855>.

BIENIAWSKI, Z. T. **Engineering Rock Mass Classifications: A Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil and Petroleum Engineering**. Canada: John Wiley & Sons, 1989.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT. IPR – 723: **Manual de Estudos de Tráfego**. Rio de Janeiro, 2006a.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT. IPR – 729: **Diretrizes Básicas Para Elaboração de Estudos e Programas Ambientais Rodoviários: Escopos Básicos/Instruções de Serviço**. Rio de Janeiro, 2006b.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT. CGPLAN – **Custos Médios Gerenciais**. Rio de Janeiro, 2011.

BRASIL; SECRETARIA ESPECIAL DE PRODUTIVIDADE E COMPETITIVIDADE; MINISTÉRIO DA ECONOMIA. **Guia Geral de Análise Socioeconômica de Custo-Benefício de Projetos de Investimento em Infraestrutura**. Brasil, 2021.

BUTTON, K. **Transport Economics**. 3^o ed. Cheltenham, UK: FSC, 2010.

CALIFÓRNIA. California Department of Transportation (Caltrans). **Analysis of Costs and Benefits for the State Route 710 North Study**. 2015. Disponível em: http://www.dot.ca.gov/dist07/resources/envdocs/docs/710study/draft_eir-eis.

CHAPMAN, D.; METJE, N.; STARK, A. **Introduction to tunnel construction**. 1. ed ed. New York: Spon Press, 2010.

COMITÊ BRASILEIRO DE TÚNEIS. CTB. Túneis do Brasil. 1 ed. DBA. 2006.

CORRÊA, M. et al. **Avaliação econômica de projetos de transporte: melhores práticas e recomendações para o Brasil**. 2010.

DE CASTRO, J.C.P.S. A influência das condicionantes geológicas nos custos de escavação de túneis rodoviários. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina UFSC, 2023.

EUROPEAN COMMISSION. Guide to Cost-Benefit Analysis of Investment Projects. 2014.

FERRARI, T. K. et al. **Estimativa do valor da vida estatística e do valor da economia de tempo em viagens nas rodovias brasileiras com a utilização de pesquisa de preferência declarada**. Rio de Janeiro. 2020.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. FHWA. Systemic Safety Project Selection Tool. 2013.

FILHO, C. L. M. Introdução à geologia de engenharia (3.ed). Santa Maria: UFSM. 2008.

GERALDI, J. L. P. O ABC das Escavações de Rocha. Rio de Janeiro: Interciência . 284 p. 2011.

HOEK, E. Pratical Rock Engineering (1. ed). Vancouver. 2006.

International Road Assessment Programme - iRAP. **Guia do usuário: Classificação por Estrelas para Desenhos (SR4D)**. 2021. Disponível em: <https://irap.org/specifications/> Acesso em: 16/03/2023

International Road Assessment Programme - iRAP. **Manual de Codificação de Vias do iRAP**. 2022. Disponível em: <https://irap.org/specifications/> Acesso em: 16/07/2023

International Road Assessment Programme - iRAP. **Módulos da metodologia iRAP n°2: Histórico de desenvolvimento**. 2013a. Disponível em: <https://irap.org/methodology/> Acesso em: 13/06/2022

International Road Assessment Programme - iRAP. **Módulos da metodologia iRAP n°7: Níveis da Classificação por Estrelas.** 2013b. Disponível em: <https://irap.org/methodology/> Acesso em: 14/06/2022

International Road Assessment Programme - iRAP. **Módulos da metodologia iRAP n°1: Visão geral.** 2014a. Disponível em: <https://irap.org/methodology/> Acesso em: 14/06/2022

International Road Assessment Programme - iRAP. **Módulos da metodologia iRAP n°6: Equações da Classificação por Estrelas.** 2014b. Disponível em: <https://irap.org/methodology/> Acesso em: 15/06/2022

KOCABAŞ, G.; SERKAN KOPURLU, B. **An Ex-Post Cost-Benefit Analysis of Bolu Mountain Tunnel Project 1.** 2010.

MACHADO, D. V. Estudo Preliminar de um Túnel Rodoviário entre Itacorubi-Lagoa da Conceição – Florianópolis/SC. Florianópolis. 2019.

MACHADO, D. V, *et al.* **Caracterização dos Acidentes Rodoviários com Alto Valor de UPS Causados Por Falta de Atenção dos Condutores.** Rio de Transportes, 2022.

MIYABUKURO, S. B. **Estudo da análise de custo-efetividade no planejamento de políticas público-privadas de longo prazo integrada à análise de custo-benefício.** Porto Alegre. 2014.

MOREIRA, C. M. DA C. Túneis, uma herança ancestral rumo ao futuro. p. 115, 2006.

NAMIN, F. S, *et al.* **New Model for Environmental Impact Assessment of Tunneling Projects.** Scientific Research. Journal of Environmental Protection, 2014, 5, 530-550 2017.

PALMSTRÖM, A. (1982). The Volumetric Joint Count a Useful and Simple Measure of the Degree of Rock Jointing. 4th International Congress of the Association Geological, Dehli, 5 vol, pp. 221-228.

PIANEZZER, T. A. Análise comparativa de metodologias para identificação de segmentos críticos em rodovias rurais. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina UFSC, 2019.

PEREIRA, F.B. Interpretação do Overbreak da Rampa Fonte Grande Sul (Mina Cuiabá) e sua interação com o sistema de suporte. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto.

SANTA CATARINA. DEPARTAMENTO DE ESTRADA E RODAGEM. DER. INSTRUÇÃO DE SERVIÇO. **DER IS-02 – SC. ESTUDO DE TRÁFEGO**, p. 23, 1998.

SANTA CATARINA, G. **Relatório Final - Consolidação das Propostas e Plano de Implementação.** Brasil, 2015.

SANTOS, C. F. **Análise de segurança viária com base na aplicação da metodologia iRAP: estudo de caso na Rodovia José Carlos Daux no município de Florianópolis.** Florianópolis. 2022.

SÃO PAULO. DEPARTAMENTO DE ESTRADA E RODAGEM. DER. **MANUAL DE SEGURANÇA VIÁRIA**, p. 577, 2023.

SÃO PAULO. DEPARTAMENTO DE ESTRADA E RODAGEM. DER. PROJETO DE TÚNEL. **DER IP-DE-C00/002 – SP. PROJETO DE TÚNEL**, p. 52, 2005.

SÃO PAULO. DEPARTAMENTO DE ESTRADA E RODAGEM. DER. INSTRUÇÃO DE PROJETO. **DER IP-DE-J00/001 – SP. ELABORAÇÃO DE ESTUDOS DE TRÁFEGO**, p. 33, 2006.

TEIXEIRA, S. et al. **Qualidade do Transporte Urbano de Passageiros: Uma avaliação do nível de serviço do sistema do metropolitano de São Paulo.** 2014.

TANGVITOONTHAM, N.; CHAIWAT, P. Economic Feasibility Evaluation of Government Investment Project by Using Cost Benefit Analysis: A Case Study of Domestic PortPort A, Laem-Chabang Port, Chonburi Province. **Procedia Economics and Finance**, v. 2, p. 307–314, 2012.

TENDER, M. L, *et al.* **The role of underground construction for the mobility, quality of life and economic and social sustainability of urban regions.** Civil Engineering. 2017.

WOOD, A. M. **Tunnelling: Management by design.** 2000.

WORLD ROAD ASSOCIATION. PIARC. **Manual de Túneis Rodoviários. Aspectos Transversais.** 2015.