

RAÍSSA RODRIGUES CARDOSO DE FARIAS

**Estudo de aderência pneu-pavimento em revestimentos asfálticos:  
análise de efetividade “antes e depois” para redução de acidentes pelo  
método *Highway Safety Manual* (HSM).**

São Paulo

2022

RAÍSSA RODRIGUES CARDOSO DE FARIAS

**Estudo da aderência pneu-pavimento em revestimentos asfálticos:  
análise de efetividade “antes e depois” para redução de acidentes pelo  
método *Highway Safety Manual* (HSM)**

**Versão Corrigida**

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo para obtenção do título de  
Mestre em Ciências.

Área de Concentração: Engenharia de Transportes

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dra. Cláudia Soares Machado

São Paulo

2022

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 19 de julho de 2022

Assinatura do autor: Raissa Farias

Assinatura do orientador: Gleiciete Soares

#### Catálogo-na-publicação

de Farias, Raissa

Estudo de Aderência pneu-pavimento em revestimentos asfálticos: análise de efetividade "antes e depois" para redução de acidentes pelo método Highway Safety Manual (HSM) / R. de Farias -- versão corr. -- São Paulo, 2022. 133 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes.

1.Atrito 2.Pneu-pavimento 3.Textura 4.Highway Safety Manual 5.Método Empírico de Bayes I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Transportes II.t.

de FARIAS. Raíssa Rodrigues Cardoso. **Estudo da aderência pneu-pavimento em revestimentos asfálticos: análise de efetividade “antes e depois” para redução de acidentes pelo método *Highway Safety Manual (HSM)***. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.

Aprovado em:

Banca Examinadora

Profa. Dra. Cláudia Aparecida Soares Machado

Instituição: Universidade de São Paulo

Julgamento: Aprovado

Prof. Dr. Flávio José Craveiro Cunto

Instituição: Universidade Federal do Ceará

Julgamento: Aprovado

Prof. Dr. José Augusto Pereira Ceratti

Instituição: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Julgamento: Aprovado

“A simplicidade é o último grau da sofisticação”

Leonardo da Vinci

## AGRADECIMENTOS

A Deus por nunca me deixar só e me trazer esperança em dias melhores.

Aos meus pais Roberval e Arlete pelo amor e por me ensinarem desde criança que a educação é o melhor caminho. Em especial “mainha” por ser meu porto seguro nos momentos mais difíceis.

Ao meu irmão caçula Arthur que tanto amo, por ser meu grande parceiro.

A minha orientadora Cláudia, por todos ensinamentos e paciência.

A todos que fazem parte do Laboratório de Tecnologia de Pavimentação, que me acolheram, me ensinaram e proporcionaram um ambiente de trabalho descontraído e acolhedor: Diomária, Lucas Pereira, Edson, Erasmo, Higor, Fernanda Gadler, Laura, Marina, Fernanda Carvalho, Guilherme Linhares, Guilherme Castro, Leidy, Júlia, Gustavo, Talita, Zila, Matheus, Robson, Iuri, João Paulo Menezes, João Paulo Carvalho, Paulo, André, Rafael Mota, Kazuo, Kamila, Rosângela.

Agradeço em especial aos meus amigos Júlia e Gustavo que chegaram em São Paulo comigo em 2019. Obrigada por todo apoio nos momentos mais difíceis, pela paciência, e amizade do nosso querido trio. A minha irmã colombiana Leidy (muhacha), por me proporcionar força e coragem em todos os momentos, deixando a vida mais alegre em ritmo de salsa.

A Zila pela amizade, apoio, parceria no mestrado e no forró. A Fernanda Gadler, sou eternamente grata ao seu companheirismo, obrigada por ter me encorajado a vir estudar em São Paulo. A Fernanda Carvalho que me mostrou o mundo da Segurança Viária. A Laura por toda ajuda em estatística e na formação do nosso time *Road Safety*.

As professoras Liedí, Kamilla e Rosângela: muito obrigada por todos os ensinamentos, por abrirem portas e por acreditarem no meu potencial.

A profa. Kamilla (coleguinha), obrigada pelos conselhos, amizade, carinho, alegria e atenção.

Ao Edson que acreditou no meu trabalho, me ensinou a ter persistência, e realizou junto comigo todas as medições em campo, sempre com muita empolgação.

A Pedrina que fez iniciação científica na presente pesquisa com bastante empenho.

A todos os professores e funcionários do Departamento de Engenharia de Transportes da Escola Politécnica da USP.

A Arteris pelo fornecimento dos dados e pelo apoio durante as medições em campo.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela disponibilidade da bolsa de pesquisa.

A minha amiga Manoela que compartilhou comigo o dia a dia em São Paulo, sempre com muita alegria, amizade e carinho.

Ao Felipe que acompanhou uma parte desta trajetória transmitindo momentos tranquilos e genuínos.

Aos meus amigos de Maceió pelo qual a distância nunca nos separou: Caio Matos, Thaíse, Karen, Isabelly, Mariana, Gabriel, Taynah, Carlos, Renan, Rodrigo, Thomas, Tamires, Lincoln, Luiza. Obrigada pelo carinho, por escutarem meus momentos de desabafo e por vibrarem em todas as minhas conquistas.

## RESUMO

Os acidentes de trânsito são mundialmente considerados um problema de saúde pública. As mortes por eles causadas crescem 1,35 milhão por ano, e aproximadamente 3.000 pessoas morrem nas estradas diariamente em todo o mundo. Diante desse cenário, os projetos de infraestruturas viárias têm um papel fundamental na redução de riscos de acidentes, por exemplo garantindo aderência entre os pneus dos veículos e a superfície do pavimento. Em pavimentos asfálticos, a textura superficial é um dos fatores principais na determinação dessa aderência, e ela é caracterizada através da medição da macrotextura e microtextura da superfície do pavimento. É nesse quadro que a presente pesquisa se concentra, tendo por objetivo analisar a efetividade da textura superficial na redução de acidentes rodoviários e a melhoria nos aspectos de segurança viária, após incorporação de mistura asfáltica com granulometria descontínua (*gap-graded*) e Tratamento Superficial Duplo (TSD) em dois estudos de caso localizados na Rodovia Régis Bittencourt – BR116. Os trechos experimentais foram construídos nos anos de 2016 (*gap-graded*) e 2017 (TSD). A verificação do desempenho das soluções asfálticas adotadas na redução da ocorrência de acidentes foi feita a partir da comparação de resultados das medições de atrito e textura na rodovia com a base de dados de registros de acidentes e volume diário médio anual atualizada até o ano de 2020. Por fim, foi desenvolvido o modelo “antes” e “depois” utilizando o método *Highway Safety Manual* (HSM) com a combinação do método Empírico de Bayes para a análise da efetividade das intervenções. Os resultados obtidos no modelo indicaram que o TSD, aplicado na pista sul, contribuiu para a redução de acidentes entre 33,93% e 45,39% após três anos de intervenção. Por outro lado, nos parâmetros avaliados, o *gap-graded*, aplicado na pista norte, não alcançou resultados satisfatórios para segurança viária após três anos de intervenção.

Palavras-chaves: Atrito. Pneu-pavimento. Textura. *Highway safety Manual*. Método Empírico de Bayes.



## ABSTRACT

Traffic accidents are worldwide recognized as a public health issue. The deaths caused by those accidents increase by 1.35 million per year, and, approximately, 3,000 people die on road accidents daily around the world. In this scenario, road infrastructure projects play a key role in accident risks mitigation, for example, ensuring a good adhesion between the vehicle tires and the pavement surface. In asphalt pavements, the surface texture is one of the main factors in determining this adhesion, and it is characterized by measuring the macro-texture and micro-texture of the pavement surface. It is in this context that the present research focuses, with the objective of analyzing the effectiveness of the surface texture in reducing road accidents and the improvement in aspects of road safety considering two different pavement wearing courses: an asphalt mixture with discontinuous granulometry (gap-graded) and a Double Bituminous Surface Treatment (DST), applied in two case studies located on the Régis Bittencourt Highway - BR116. The experimental test sites were built in 2016 (gap-graded) and 2017 (DST). The performance of the proposed mix asphalt solutions for reducing accidents was verified from the comparison of the surface friction and texture measurements in the highway with the updated database of accident records and the annual average daily volume until 2020. Finally, an accident prediction statistical model using the Highway Safety Manual (HSM) model was developed to verify the effectiveness of the actions taken. The results obtained in the model suggest that the TSD, applied on the south lane, contributed between 33.93% and 45.39% to the reduction of accidents, after three years of intervention. On the other side, in the assessed parameters, the gap-graded applied on the north lane, did not achieve satisfactory results for road safety after the same evaluation period.

Keywords: Friction. Tire-pavement. Texture. Highway Safety Manual. Bayes' empirical method.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Rede de cocitação (Análise 1) .....	7
Figura 2 - Rede de países (Análise 1).....	8
Figura 3 - Rede de palavras-chaves (Análise 1) .....	9
Figura 4 - Rede de cocitação (Análise 2) .....	10
Figura 5 - Rede de países (Análise 2).....	11
Figura 6 - Rede de palavras-chaves (Análise 2) .....	12
Figura 7 - Relatório de citações: Aplicação de palavras-chaves .....	14
Figura 8 - Relatório de citações: Seleção de artigos .....	14
Figura 9 - Interação pneu-pavimento .....	16
Figura 10 - Mecanismos de forças de atrito .....	18
Figura 11 - Força de Atrito e suas propriedades .....	19
Figura 12 - Pêndulo Britânico .....	22
Figura 13 - Equipamento Adhera .....	23
Figura 14 - ASTM E-274 .....	24
Figura 15 - SCRIM .....	24
Figura 16 - <i>Mu-meter</i> MK6 .....	25
Figura 17 – <i>Grip-tester</i> .....	26
Figura 18 - Mancha de areia, utilizando micro-esferas de vidro.....	27
Figura 19 - Drenômetro LTP-USP .....	29
Figura 20 - Curva de referência do modelo IFI.....	32
Figura 21- Interação entre os componentes causais de acidentes .....	35
Figura 22 - Etapas de aplicação do modelo HSM .....	46
Figura 23 - Etapas do processo de gestão para Segurança Viária .....	57
Figura 24 - Fluxograma da metodologia utilizada na presente pesquisa. ....	63
Figura 25 - Localização da Rodovia Régis Bittencourt.....	65
Figura 26 - Processo de calibração do <i>grip-tester</i> .....	68
Figura 27 - Leitura dinâmica de atrito com equipamento <i>grip-tester</i> realizadas no Campus da USP (Butantã – São Paulo - SP).....	68
Figura 28 – Montagem do equipamento <i>grip-tester</i> e monitoramento dos trechos experimentais na Rodovia Régis Bittencourt.....	69
Figura 29 - Quilômetros críticos – Acidentes Totais - Rodovia Régis Bittencourt - Pista Norte.....	72

Figura 30 - Quilômetros críticos – Acidentes Totais - Rodovia Régis Bittencourt - Pista Sul.....	72
Figura 31 - Distribuição granulométrica da mistura empregada no trecho experimental da pista norte .....	76
Figura 32 - Textura da mistura asfáltica aplicada em campo. ....	76
Figura 33 - Trecho experimental norte 1 .....	77
Figura 34 - Execução do trecho experimental norte 1 .....	77
Figura 35 - Trecho experimental norte 2 .....	78
Figura 36 - Execução do trecho experimental norte 2.....	78
Figura 37 - Pré envolvimento realizado nos agregados (brita 1 e pedrisco, respectivamente).....	81
Figura 38 - Textura obtida após aplicação da primeira camada.....	81
Figura 39 - Trecho experimental sul 1 .....	82
Figura 40 - Execução do trecho experimental sul 1 .....	82
Figura 41 - Trecho experimental sul 2.....	83
Figura 42 - Execução do trecho experimental sul 2 .....	83
Figura 43- Definição dos segmentos homogêneos em interseções .....	89
Figura 44 - Pista Norte: Divisão dos segmentos homogêneos.....	90
Figura 45 - Pista Sul: Divisão dos segmentos homogêneos .....	92
Figura 46 - Número de acidentes na Rodovia Régis Bittencourt no período de 2010 a 2020 (Pista Norte) .....	96
Figura 47 - Número de acidentes na Rodovia Régis Bittencourt no período de 2010 a 2020 .....	97
Figura 48 – Quantidade de acidentes (trecho experimental norte 1).....	99
Figura 49 - Quantidade de acidentes (trecho experimental norte 2) .....	100
Figura 50 - Quantidade de acidentes (trecho experimental sul 1).....	100
Figura 51 - Quantidade de acidentes (trecho experimental sul 2).....	100
Figura 52 - Trecho experimental norte 1 - (km 519 a km 517) .....	118
Figura 53 - Trecho experimental norte 2 -(km 546 – km 544) .....	119
Figura 54- Trecho experimental sul 1 (2020) - (km 548 – km 550).....	120
Figura 55- Trecho experimental sul 1 (2021) - (km 548 – km 550).....	120
Figura 56- Trecho experimental sul 2 (2020) - (km 559 – km 564).....	121
Figura 57- Trecho experimental sul 2 (2021) - (km 559 – km 564).....	121

Figura 58- grip-number – Trecho experimental norte 1 – Aplicação de gap-graded .....	122
Figura 59 - grip-number – Trecho experimental norte 2 – Aplicação de gap-graded .....	122
Figura 60- grip-number – Trecho experimental sul 1 – Aplicação de TSD .....	123
Figura 61- grip-number – Trecho experimental sul 2 – Aplicação de TSD .....	123
Figura 62 - Classificação IFI - trecho experimental norte 1 ( <i>gap-graded</i> : faixa 01) .....	125
Figura 63 - Classificação IFI - trecho experimental norte 1 ( <i>gap-graded</i> : faixa 02) .....	125
Figura 64 - Classificação IFI - trecho experimental norte 2 ( <i>gap-graded</i> : faixa 01) .....	126
Figura 65 - Classificação IFI - trecho experimental norte 2 ( <i>gap-graded</i> : faixa 02) .....	126
Figura 66 - Classificação IFI - trecho experimental sul 1 (TSD: faixa 01) .....	127
Figura 67- Classificação IFI - trecho experimental sul 1 (TSD: faixa 02) .....	128
Figura 68 - Classificação IFI - trecho experimental sul 1 (TSD: faixa 03) .....	128
Figura 69 - Classificação IFI - trecho experimental sul 2 (TSD: faixa 01) .....	129
Figura 70 - Classificação IFI - trecho experimental sul 2 (TSD: faixa 02) .....	129

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação da textura de um pavimento.....	20
Tabela 2 - Tipo de superfície em função da classe de microtextura e macrotextura .....	21
Tabela 3 - Classificação da microtextura com o Pêndulo Britânico (ABPV, 1998) .....	23
Tabela 4 - Classes de microtextura pelo método da Mancha de Areia .....	28
Tabela 5 - Faixas de classificação do IFI .....	33
Tabela 6 - Largura da faixa de rolamento .....	49
Tabela 7- Largura do acostamento .....	49
Tabela 8- Largura do canteiro central .....	49
Tabela 9- Coeficientes de regressão para equações de trechos homogêneos em rodovias de pista dupla.....	51
Tabela 10 - Condições 'base' da SPF para trechos de rodovias rurais de pista dupla.....	52
Tabela 11 - CMF conforme a largura média de acostamento .....	53
Tabela 12 - CMF conforme a largura média da divisão central .....	53
Tabela 13 - Segmentos homogêneos e praças de pedágio – Rodovia Régis Bittencourt.....	70
Tabela 14 - Trechos selecionados mais críticos de acidentes .....	75
Tabela 15 - Dosagem da mistura .....	76
Tabela 16 - Análise do CAP Borracha utilizado no trecho experimental sul 1..	79
Tabela 17 - Análise do CAP Borracha utilizado no trecho experimental sul 2..	79
Tabela 18 - Propriedades do agregado.....	80
Tabela 19 - Granulometria do agregado .....	80
Tabela 20 - Taxas de aplicação dos materiais para execução do TSD.....	80
Tabela 21 - Medições de Atrito e Textura .....	84
Tabela 22 - Sentido Norte - Medições de atrito com equipamento <i>grip-tester</i> (2020).....	85
Tabela 23 - Sentido Sul - Medições de atrito com equipamento <i>Grip-Tester</i> (2020) .....	86
Tabela 24 - Sentido Sul - Medições de atrito com equipamento <i>Grip-Tester</i> (2021) .....	87

Tabela 25 - Divisão dos segmentos homogêneos pista norte .....	91
Tabela 26 - Volume Diário Médio Anual da Pista Norte .....	91
Tabela 27 - Divisão dos segmentos homogêneos pista sul .....	92
Tabela 28 - Volume Diário Médio Anual da Pista Sul.....	93
Tabela 29 - Quantidade de acidentes ocorridos na Rodovia Régis Bittencourt	97
Tabela 30 - Taxa de acidentes por milhões de veículos x km.....	97
Tabela 31 - Quantidade de acidentes nos trechos experimentais.....	98
Tabela 32 - Taxa de acidentes por milhões de veículos x km nos trechos experimentais.....	98
Tabela 33 - Número de acidentes previsto (pista norte - não calibrado) .....	102
Tabela 34 - Fator de calibração (pista Norte).....	103
Tabela 35 - Valores obtidos após a aplicação da calibração e do método EB (pista norte - 2013 a 2015) .....	104
Tabela 36 - Valores obtidos após a aplicação da calibração e do método EB (pista norte - 2017 a 2019) .....	105
Tabela 37 - Resumo dos resultados obtidos no modelo preditivo (pista norte) .....	106
Tabela 38 - Qualidade do ajuste (pista Norte).....	106
Tabela 39 – Número de acidentes previsto (pista sul - não calibrado).....	107
Tabela 40 - Fator de calibração (pista Sul) .....	108
Tabela 41 - Valores obtidos após a aplicação da calibração e do método EB (pista sul - 2014 a 2016).....	109
Tabela 42 - Valores obtidos após a aplicação da calibração e do método EB (pista sul - 2018 a 2020).....	110
Tabela 43 - Resumo dos resultados obtidos no modelo preditivo (pista sul) .	111
Tabela 44 - Qualidade do ajuste (pista sul) .....	112
Tabela 45 - Resumo dos resultados obtidos período antes (pista Norte).....	113
Tabela 46 - Valores obtidos no modelo após aplicação do método EB (pista norte - período depois) .....	113
Tabela 47 - Análise da efetividade do tratamento (gap-graded).....	114
Tabela 48 - Resumo dos resultados obtidos período antes (pista Sul) .....	114
Tabela 49 - Valores obtidos no modelo após aplicação do método EB (pista sul - período depois) .....	115
Tabela 50 - Análise da efetividade do tratamento (TSD).....	115

Tabela 51 - Análise comparativa da efetividade do TSD - pista Sul.....	115
Tabela 52- Classificação da macrotextura .....	116
Tabela 53 - Esquematização das medições em campo com grip-tester .....	117

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1	OBJETIVOS	4
1.2	ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO	5
<b>2</b>	<b>ESTUDO BIBLIOMÉTRICO</b>	<b>6</b>
2.1	ANÁLISE DAS REDES	7
2.2	AFERIÇÃO DOS RESULTADOS ATRAVÉS DE INDICADORES BIBLIOMÉTRICOS	12
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>14</b>
3.1	INTERAÇÃO PNEU-PAVIMENTO	15
3.1.1	Mecanismos de aderência pneu-pavimento	16
3.1.2	Textura superficial	19
3.2	METODOLOGIAS PARA MEDIÇÃO DE TEXTURA	21
3.2.1	Medição de atrito do pavimento	22
3.2.2	Medição da macrotextura	26
3.2.3	Harmonização das medições de atrito do pavimento	29
3.3	CARACTERÍSTICAS DAS MISTURAS ASFÁLTICAS	33
3.4	SISTEMAS SEGUROS	34
3.4.1	Principais causas de sinistros de trânsito	35
3.4.2	Influência dos elementos viários na ocorrência de acidentes	37
3.5	MODELOS DE PREVISÃO DE ACIDENTES	43
3.5.1	Modelo do Highway Safety Manual	45
3.5.2	Método do HSM para previsão de acidentes em rodovias de pista dupla	46
3.5.3	Grau de Severidade dos acidentes	47
3.5.4	Determinação dos trechos homogêneos	48
3.5.5	Função de Desempenho de Segurança (SPF's)	50
3.5.6	Aplicação dos fatores de calibração (CMF's)	51
3.5.7	Método Empírico de Bayes (EB)	55
3.5.8	Análise da Efetividade de uma intervenção: Estudos “Antes e Depois” .....	57
3.5.8.1	Implementação do Método EB nos estudos antes-depois	58



<b>4 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>63</b>
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA RODOVIA EM ESTUDO.....	64
4.2 ESTUDO DE CASO .....	65
4.3 PROCEDIMENTO DE MEDIÇÃO DE ATRITO: EQUIPAMENTO GRIP- TESTER.....	67
4.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA DE ACIDENTES .....	69
<b>4.4.1 Volume Diário Médio Anual .....</b>	<b>69</b>
<b>4.4.2 Taxas de acidentes.....</b>	<b>70</b>
<b>4.4.3 Análises Espaciais .....</b>	<b>70</b>
<b>4.4.4 Análises Estatísticas Descritivas.....</b>	<b>73</b>
4.5 TRECHOS EXPERIMENTAIS .....	75
<b>4.5.1 Pista Norte .....</b>	<b>75</b>
<b>4.5.2 Pista Sul .....</b>	<b>79</b>
4.6 MEDIÇÕES DE CAMPO .....	83
4.7 MODELO DE PREVISÃO DE ACIDENTES .....	87
<b>4.7.1 Período de Análise .....</b>	<b>88</b>
<b>4.7.2 Divisão da Rodovia em Trechos Homogêneos.....</b>	<b>88</b>
<b>4.7.3 Calibração do Método HSM para os trechos críticos de acidentes ..</b>	<b>93</b>
<b>4.7.4 Aplicação do Método Empírico de Bayes .....</b>	<b>95</b>
<b>4.7.5 Aplicação do Método Antes e Depois.....</b>	<b>95</b>
<b>5 RESULTADOS.....</b>	<b>95</b>
5.1 ANÁLISE PRELIMINAR DOS DADOS DE ACIDENTES.....	96
5.2 DESENVOLVIMENTO DO MODELO DE CALIBRAÇÃO DO MÉTODO HSM EM RODOVIAS B.....RASILEIRAS RURAIS DE PISTA DUPLA .....	101
<b>5.2.1 Pista Norte .....</b>	<b>102</b>
<b>5.2.2 Pista Sul .....</b>	<b>107</b>
5.3 APLICAÇÃO DO MODELO ANTES E DEPOIS (MÉTODO - HSM) .....	112
<b>5.3.1 Pista Norte .....</b>	<b>112</b>
<b>5.3.2 Pista Sul .....</b>	<b>114</b>
5.4 AVALIAÇÃO DAS MEDIÇÕES DE CAMPO.....	116
<b>5.4.1 Avaliação da macrotextura.....</b>	<b>116</b>
<b>5.4.2 Avaliação da microtextura.....</b>	<b>117</b>
<b>5.4.3 International Friction Index (IFI).....</b>	<b>124</b>

<b>6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS .....</b>	<b>130</b>
<b>7 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>131</b>
7.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	132
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>133</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS, 2018), as mortes causadas por acidentes de trânsito atingem 1,35 milhão por ano. Nesse contexto, aproximadamente 3.000 pessoas morrem nas estradas diariamente em todo o mundo. No Brasil, os acidentes de transporte terrestre são umas das principais causas de óbitos do país, matando cerca de 43 mil pessoas por ano, sendo a principal causa de mortes de jovens entre 15 e 29 anos (IPEA, 2015; OMS, 2018). Conforme os últimos dados do painel da Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2019), 67.427 acidentes de trânsito foram registrados em 2019 nas rodovias federais, sendo 55.756 com vítimas (mortes ou feridos). Além disso, as condições psicológicas e estresses traumáticos que as vítimas dos acidentes e seus familiares são submetidos, causam danos, muitas vezes, irreversíveis.

Em 1997, o parlamento sueco definiu a estratégia denominada como “Visão Zero”, fundamentada no princípio de que é inaceitável a perda de vidas em um sistema rodoviário de transportes, estabelecendo responsabilidade compartilhada entre os usuários do sistema, planejadores e gestores (CNT, 2018). No ano de 2010, a Assembleia Geral da Organização das Nações Unidas (ONU) caracterizou os acidentes de trânsito como um problema mundial de saúde pública, e estabeleceu a “Década de Ações para Segurança Viária”, referente ao período de 2011 a 2020, com objetivo de comprometer governantes de diversos países a adotarem soluções para redução do número de acidentes viários. Em 2013, a OMS propôs cinco pilares de atuação para a Segurança Viária, sendo eles: mobilidade e gestão; estradas e veículos mais seguros; conscientização dos usuários; melhor resposta pós-acidente; e atendimento hospitalar (OMS, 2015). Apesar dos esforços das Nações Unidas e de outras entidades de segurança no trânsito, o número de mortes em termos absolutos permaneceu, em sua grande maioria, inalterado. Nesse sentido, reconhecendo a necessidade em atingir os objetivos propostos na primeira década, a OMS publicou a Segunda Década de Ação pela Segurança no Trânsito (2021-2030), por meio da resolução 74/299, com principal meta de reduzir pela metade as mortes e lesões causadas em acidentes de trânsito. Adicionalmente a este

objetivo, aborda-se uma visão mais ampla da redução dos acidentes de trânsito associada ao desenvolvimento sustentável (OMS, 2021).

Segundo o relatório da CNT (2019), o custo financeiro dos acidentes rodoviários entre os anos 2009 e 2019 foram de R\$ 156 bilhões. Por outro lado, no mesmo período, o volume dos investimentos governamentais em infraestrutura e manutenção das atividades da Polícia Rodoviária Federal (PRF) foram de R\$ 172,06 bilhões. Em 2019, o país mobilizou R\$ 10,28 bilhões em função dos acidentes rodoviários. Nesse sentido, é perceptível que os gastos com acidentes de trânsito podem ser convertidos em investimentos no setor de infraestrutura de transportes, como também, em outras áreas como: educação, saúde e economia.

No intuito de reduzir a ocorrência de acidentes nas rodovias e priorizar a vida, o estudo de "Acidentes Rodoviários e Infraestrutura de 2018" indicou a necessidade de intervenções, como adequação, construção e manutenção das rodovias, para promover a melhora da qualidade da infraestrutura viária (CNT, 2018).

O pavimento deve propiciar boas condições de rolamento para conforto, economia e segurança do usuário durante a vida útil estabelecida em projeto. A avaliação da Segurança Viária depende de vários aspectos, tais como: a textura superficial do pavimento; a sinalização horizontal e vertical; o traçado geométrico da via, do comportamento do motorista e demais usuários, e das condições do veículo. Em relação às condições superficiais do pavimento, é importante avaliar os mecanismos de aderência que, por sua vez, são verificados pelo coeficiente de atrito existente na interação pneu-pavimento (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Segundo Noyce *et al.* (2005), os valores de atrito devem ser medidos em locais em que as condições do pavimento manifestam potenciais problemas para a Segurança Viária. Tais problemas são: envelhecimento, deformação permanente, acúmulo de água e superfície com contaminantes. Uma das principais dificuldades para quantificar o atrito é a variabilidade de métodos de medição para resistência à derrapagem, que limitam comparações diretas entre diferentes tipos de equipamentos. Ressalta-se que as variações climáticas interferem diretamente nestas medições. Em condições de pista molhada, por exemplo, a formação do filme d'água entre pneu-pavimento causa o fenômeno

conhecido como hidroplanagem ou aquaplanagem, que reduz o valor do atrito, por conta da quebra na adesão entre pneu-pavimento.

A textura superficial é considerada um dos principais fatores que afetam diretamente na aderência pneu-pavimento, por isso, tem-se buscado selecionar diferentes tipos de misturas asfálticas a fim de proporcionar uma melhor aderência pneu-pavimento, levando em consideração: a distribuição granulométrica e o volume de vazios dessa mistura. Shimeno e Tanaka (2010), realizaram um estudo de caso no Japão, no qual observaram que a aplicação da mistura gap-graded reduziu significativamente a taxa de mortalidade de acidentes viários em climas úmidos quando comparado ao concreto asfáltico convencional.

Hernandez-Saenz *et al.* (2016) constataram que nos Estados Unidos, têm-se optado pelo uso da mistura Camada Porosa de Atrito (CPA) nas rodovias, por apresentar melhores condições superficiais. Essas misturas são caracterizadas pelo elevado teor de vazios de ar, proporcionando maior permeabilidade, condição favorável para redução de acidentes em pista molhada. Além disso, esse tipo de mistura reduz o efeito *splash e spray*, (ou seja, quando os pneus dos veículos interagem com o pavimento molhado, e parte da água é levada ao ar, produzindo uma nuvem de partículas d'água, que reduz a visibilidade dos usuários (condutores de veículos e pedestres) e compromete a segurança (CALTRANS, 2007), em torno de 95% quando comparado a misturas asfálticas convencionais, melhorando as condições de visibilidade.

Wang H. e Wang Z. (2013), nos Estados Unidos e no Canadá, analisaram a eficácia da preservação do pavimento quanto ao desempenho do atrito em quatro tipos de tratamentos superficiais: micro revesti mento, lama asfáltica, selagem de trincas e camada delgada. Nesse estudo, as medições de atrito foram realizadas no período de dois meses à quatro anos, com o intuito de avaliar o coeficiente de atrito do revestimento em diferentes intervalos de monitoramento. Os resultados mostraram que a lama asfáltica obteve valor de atrito mais elevado em relação aos demais tipos de tratamento. Esse fato, pode estar associado à mistura de emulsão asfáltica e agregado garantir uma boa combinação entre a microtextura e macrotextura. No entanto, analisar a combinação do coeficiente de atrito e Segurança Viária é uma abordagem complexa, uma vez que, a causa do acidente de trânsito raramente está

associada a um único fator. Desse modo, o presente estudo propõe avaliar diferentes texturas superficiais por meio do monitoramento em campo do estudo “antes e depois” da intervenção no pavimento, com a finalidade de alcançar melhorias para Segurança Viária, reduzindo a taxa de acidentes de uma rodovia e impactando positivamente na sociedade como um todo.

## 1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral deste estudo é analisar a efetividade da textura superficial na redução de acidentes rodoviários e a melhoria nos aspectos de segurança viária, após incorporação de mistura asfáltica com granulometria descontínua (*gap-graded*) e Tratamento Superficial Duplo (TSD) em dois estudos de caso localizados na rodovia Régis Bittencourt (BR116). Para isso, traçaram-se os seguintes objetivos específicos:

- Acompanhar a evolução temporal de indicadores de condição superficial em quatro trechos experimentais, a partir do monitoramento em campo e por meio dos resultados de medição do atrito pneu-pavimento pós-intervenção.
- Estimar a frequência de acidentes em segmentos homogêneos utilizando a metodologia do HSM- *Highway Safety Manual*, com aplicação do método empírico de Bayes para rodovias rurais de pista dupla.
- Avaliar a eficiência das soluções aplicadas por meio dos estudos “antes” e “depois” do HSM – *Highway Safety Manual* com a combinação do Método Empírico de Bayes.

## 1.2 ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho está organizado em sete capítulos listados a seguir:

O capítulo 1 apresenta a redução da ocorrência de acidentes de trânsito como motivação principal desta pesquisa. Nesse capítulo são estabelecidos os objetivos e a estruturação do texto.

No Capítulo 2 é apresentado o estudo bibliométrico sobre os temas relativos à Segurança Viária. Será apresentada a metodologia utilizada para aplicação desse procedimento.

O capítulo 3 discute a revisão bibliográfica sobre o tema tratado. Os principais assuntos abordados são: textura superficial do pavimento, mecanismos de aderência pneu-pavimento, através da abordagem de Sistemas Seguros. Para isso, serão apresentados alguns modelos de previsão de acidentes, assim como o método *Highway Safety Manual* (HSM) em rodovias rurais de pista dupla.

O capítulo 4 apresenta: (i) os métodos utilizados para as medições de atrito pneu-pavimento para análise da textura superficial nos trechos experimentais; (ii) a descrição dos trechos experimentais: detalhamento dos trechos em estudo, análise dos dados dos acidentes e as características das soluções das misturas asfálticas analisadas; e por fim, (iii) discute a aplicação dos estudos “antes e depois” para a verificação da efetividade das intervenções realizadas nos trechos experimentais.

O capítulo 5 apresenta os resultados obtidos no modelo estatístico preditivo de acidentes, a aplicação do método “antes” e “depois” do manual HSM e os resultados encontrados de atrito após aferição em campo

O capítulo 6 faz uma análise geral da efetividade da intervenção, relacionando os resultados obtidos de atrito e a efetividade do tratamento por meio dos estudos “antes e depois” do manual HSM.

No capítulo 7 são apresentadas as considerações finais sobre o estudo e sugestões para trabalhos futuros.

## 2 ESTUDO BIBLIOMÉTRICO

A palavra da bibliometria é oriunda da junção do sufixo “metria” e de bibliografia, informação, ciência e biblioteca (SILVA, *et al.*, 2012). A técnica bibliométrica é um método quantitativo e estatístico com o objetivo de medir os índices de produção e disseminar o conhecimento científico. Esse método vem ganhando popularidade no meio acadêmico, auxiliando nos estudos de pesquisadores em função da grande quantidade de materiais bibliográficos.

A principal razão para utilização desta técnica está relacionada à necessidade em obter-se uma visão sistematizada e produtiva, assim como, estabelecer uma melhor comunicação entre diversos autores. (POTTER, 1981; ARAÚJO, 2006). As principais leis que regem este método são: Lei de Bradford (produtividade de periódicos), Lei de Lotka (produtividade científica de autores) e Lei de Zipf (frequência de palavras) (GUEDES e BORSCHIVER, 2005).

Em uma análise *post hoc*, classificou-se a bibliometria em três categorias, sendo a primeira a se destacar pelos temas de pesquisas mais estudados em uma determinada área, correlacionando os principais autores que mais publicam em revistas e periódicos (Mazzon e Hernandez, 2013; Cardoso e Kato, 2015; Guerrazi *et al.*, 2015). A segunda tem como finalidade conhecer o domínio metodológico em uma linha de pesquisa, preocupando-se em destacar o histórico de pesquisa de uma determinada área (Brown e Dant, 2009; Kraft *et al.*, 2015). Por fim, a terceira categoria apresenta as análises quantitativas, tendo como foco mostrar tendências de temas relevantes em estudos futuros.

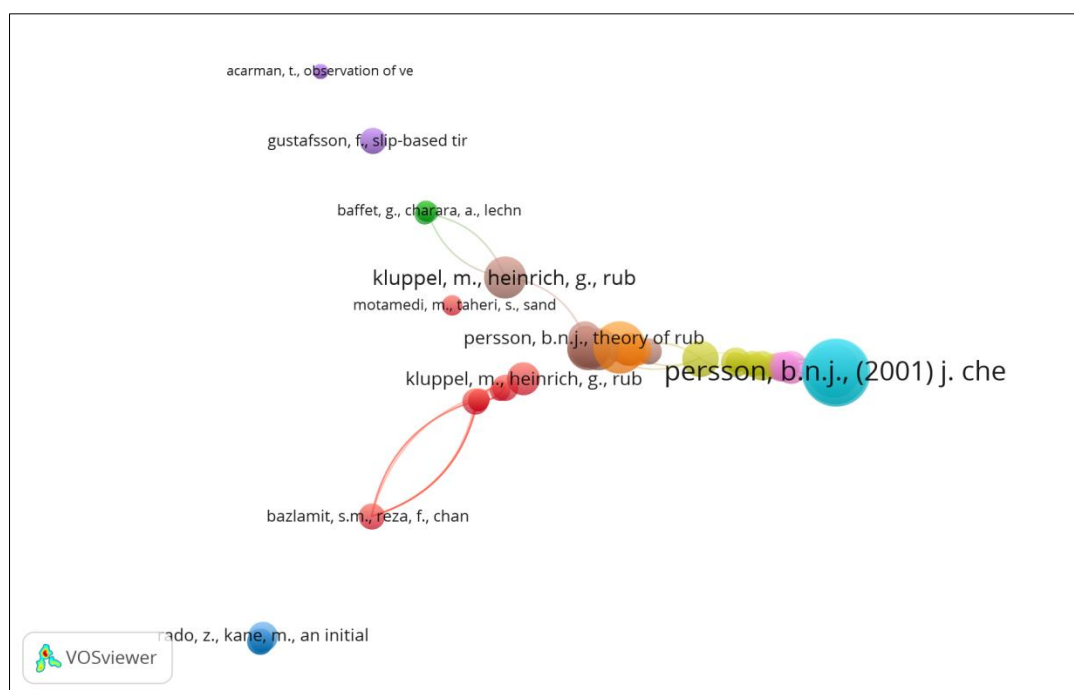
Na presente pesquisa, realizou-se um estudo bibliométrico para identificação da rede com os principais autores, países e palavras-chaves aplicada aos Sistemas Seguros. A primeira etapa de aplicação do método foi a delimitação das palavras-chaves adequadas para a qualidade de busca na base de dados Scopus. Para essa análise, utilizou-se o software VOSviewer, indicado para elaboração de grafos para estudos bibliométricos. A segunda etapa foi a verificação da relevância do tema da presente pesquisa na academia por meio da aplicação de indicadores bibliométricos.



## 2.1 ANÁLISE DAS REDES

Nesse item será proposta uma análise de redes de relacionamento para estudo bibliométrico dos termos provenientes da base de dados Scopus, utilizando o software VOSviewer. Em uma primeira análise utilizou-se as palavras-chaves: “interação pneu-pavimento”, “atrito”, “fricção de borracha”, “segurança viária”. Em seguida, foram gerados na base Scopus um total de 887 documentos e após aplicação de filtros de publicações de artigos em revistas e em congressos de engenharia, esse número foi reduzido para 587. O primeiro grafo, apresentado na Figura 1, mostra a estrutura de cocitação entre os pesquisadores. Essas redes de coautorias são fundamentais para a visualização das relações entre os pesquisadores.

Figura 1 - Rede de cocitação (Análise 1)



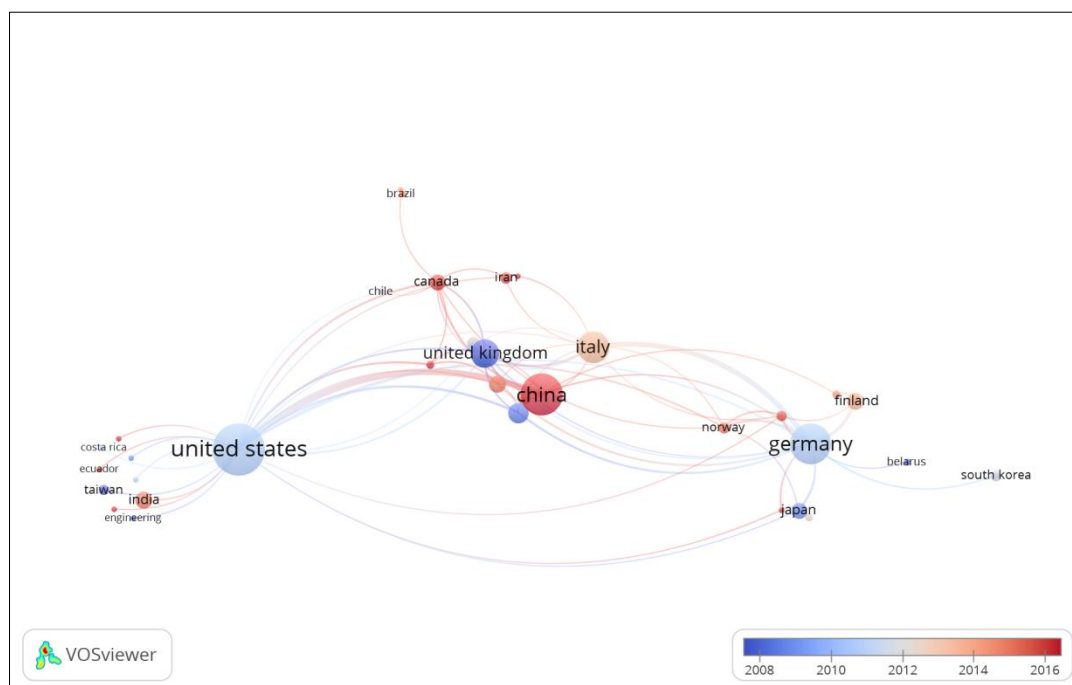
Fonte: A autora (2022)

Na visualização de rede, os itens são representados por círculos e o tamanho de cada círculo determina o peso do item (número de documentos e citações realizadas), assim, quanto maior for o tamanho do círculo, maior o peso do item. Além disso, a cor de um item corresponde ao *cluster* ao qual o item pertence e quanto mais próximos dois clusters estão entre si, mais forte são seus laços (VANECK e WALTMAN, 2018).

Por meio dessa análise, foram contabilizados nove clusters. Evidencia-se uma frente de pesquisa de maior impacto entre os pesquisadores PERSSON B.N.J (azul claro), KLUPPEL (laranja). De forma geral, é possível observar que não há uma rede detectável de autores desenvolvendo e estudando esses temas de forma conjunta e colaborativa, ou seja, as pesquisas são, na maioria das vezes, conduzidas de forma segregada e sem interação de múltiplas organizações.

A Figura 2 apresenta a rede de países que mais publicaram trabalhos relacionados a interação pneu-pavimento.

Figura 2 - Rede de países (Análise 1)

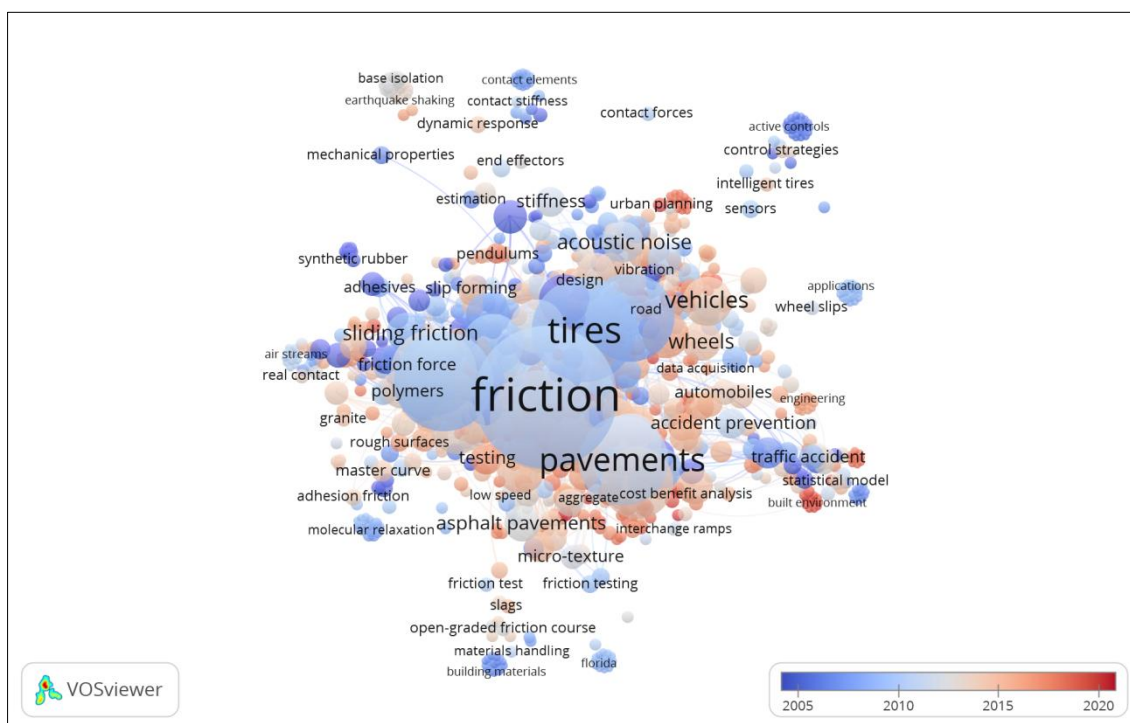


Fonte: A autora (2022)

Observou-se que os países em destaque são: os Estados Unidos da América, o Reino Unido, a Alemanha e a China, formando uma grande rede de cooperação entre eles. Através da linha do tempo (2008 a 2016), nota-se que o Reino Unido realiza pesquisa sobre o tema tratado desde o ano de 2008, vindo em seguida os Estados Unidos e a Alemanha. Além disso, a China se destaca fortemente com estudos mais recentes, a partir de 2016. O Brasil apresenta um pequeno *cluster* se relacionando diretamente com o Canadá que, por sua vez, se relaciona com o Reino Unido, China, Irã, Estados Unidos, Itália e Noruega. A Itália também representa um *cluster* relevante e com estudos mais recentes.

Pelas redes de palavras-chaves (Figura 3) é possível observar as palavras mais importantes e mais citadas entre as pesquisas. Através da linha do tempo é possível observar a tendência de abordagem para novos assuntos, entre eles: “prevenção de acidentes”, “veículos”, “automóveis”, “planejamento urbano”, “superfícies”, sendo representadas com a cor vermelha.

Figura 3 - Rede de palavras-chaves (Análise 1)

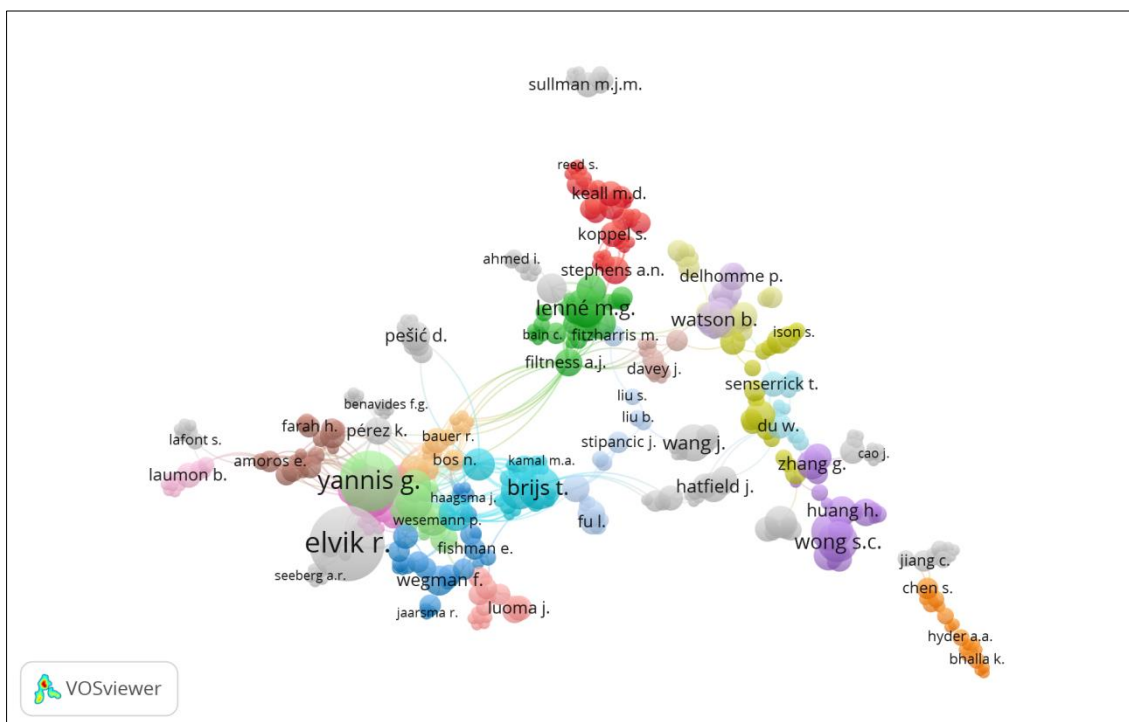


Fonte: A autora (2022)

Conforme observado na Figura 3, evidencia-se também que as palavras-chaves: ‘atrito’, ‘pavimento’, ‘pneu’, ‘acidentes de tráfego’, (azul escuro) representam uma frente de pesquisa já bastante explorada entre os pesquisadores.

Em uma segunda análise foram utilizadas as palavras chaves: “rodovias e segurança”, “segurança viária”, “tráfego e segurança” e “acidentes de trânsito”. Em seguida, foram gerados na base Scopus um total de 2.263 documentos e após aplicação de filtros de publicações de artigos em revistas e em congressos de engenharia, esse número foi reduzido para 1.026. A Figura 4 apresenta a rede de cocitação entre os autores.

Figura 4 - Rede de cocitação (Análise 2)

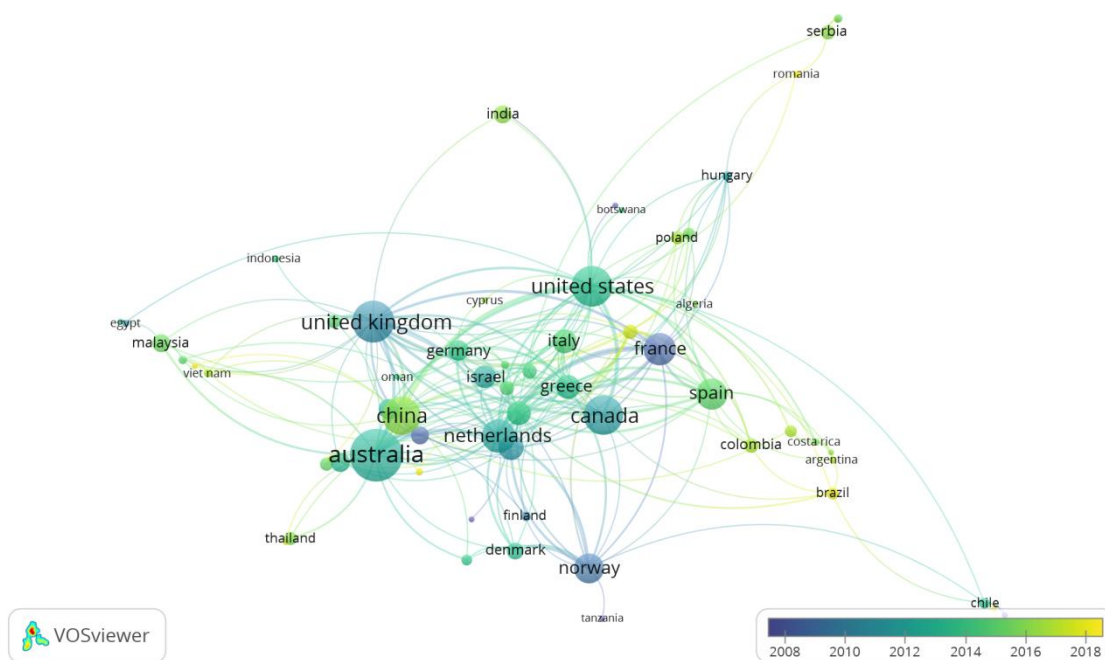


Fonte: A autora (2022)

Em destaque entre os clusters estão os autores: ELVIK R (cinza claro), YANNIS G. (verde claro), BRIJS T (azul claro), WONG S. C (lilás). É perceptível que esse grafo difere da rede de cocitação apresentada na primeira análise (Figura 1) por apresentar uma rede mais conectada, ou seja, formando relações mais fortes entre os pesquisadores. Nota-se que os autores estão sempre ligados a uma rede, ou seja, não produzem trabalhos de maneira independente e isolada, justamente o contrário do que se observou na análise 1 (anterior).

A Figura 5 apresenta a rede de países que mais publicaram conforme as palavras-chaves utilizadas nesse segundo estudo bibliométrico.

Figura 5 - Rede de países (Análise 2)

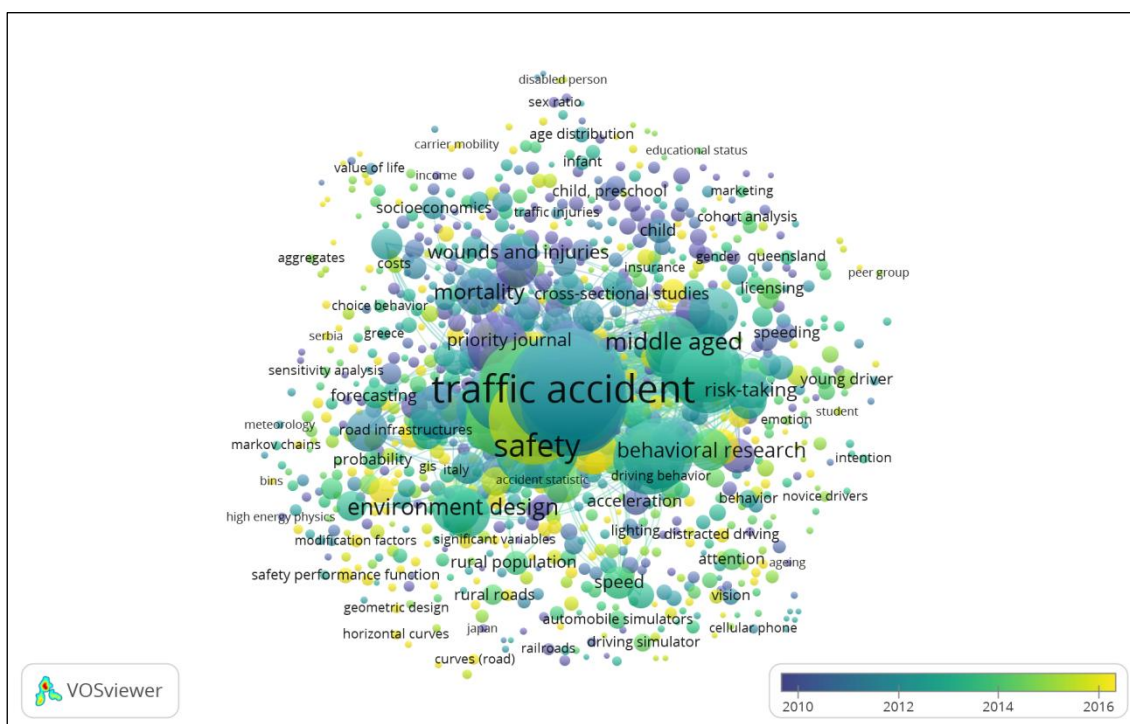


Fonte: A autora (2022)

Conforme indicado na Figura 5, os Estados Unidos destacam-se por estabelecer uma rede de interação entre diversos países. Entretanto, as publicações pioneiras da temática em estudo são representadas pela França, Reino Unido, Canadá e Austrália. O Brasil, assim como os demais países latinos apresentam estudos mais recentes (2016 a 2018).

A Figura 6 apresenta a rede palavras-chaves que enfatizam os assuntos mais abordados na área de Sistemas Seguros entre os pesquisadores.

Figura 6 - Rede de palavras-chaves (Análise 2)



Fonte: A autora (2021)

Ao observar a rede, verificam-se estudos mais recentes relacionados a modelagem, modelos estatísticos, simuladores de tráfego, processamento de imagens e meio-ambiente. Os *clusters* em destaque são os estudos mais antigos associados aos acidentes de tráfego.

## 2.2 AFERIÇÃO DOS RESULTADOS ATRAVÉS DE INDICADORES BIBLIOMÉTRICOS

Para aferição dos resultados obtidos na análise bibliométrica foram utilizados indicadores de desempenhos acadêmicos, entre eles o mais famoso é o FI (fator de impacto), empregado na avaliação da relevância de um determinado artigo publicado na comunidade científica. Também foram utilizados os indicadores: *Journal Citation Report* (JCR) que representa o impacto dos artigos publicados em revistas científicas, o h-índice e o índice M (BRAGA *et al.*, 2002).

O fator de impacto (FI), gerado pelo *Science Citation Index* (SCI) é definido como o número de vezes que os artigos de uma revista científica parecem citados e publicados nos dois anos anteriores, dividido pelo total de

artigos por ela publicados. O FI é obtido através da Equação 1 (GARFIELD, 1955).

Equação 1 - Cálculo do fator de impacto (FI)

$$FI = \frac{\text{citações recebidas no ano atual em artigos publicados nos últimos 2 anos}}{\text{nº de artigos publicados nos últimos 2 anos}} \quad (1)$$

Fonte : Web of Science (2020)

Para verificação da relevância do tema analisado, calcula-se o índice M por meio da Equação 2, a seguir:

Equação 2 - Cálculo do índice M

$$\text{Índice } M = \frac{h - \text{index}}{N} \quad (2)$$

Fonte : Web of Science (2020)

Sendo:

*h - index* = índice fornecido pela *Web of Science* e fundamentado no número de publicações e citações.

*N* = número de anos decorridos a partir da primeira publicação do tema.

Classificação:

Índice *M* < 0,5: tema pouco interessante para academia;

0,5 < Índice *M* < 2,0: Hot Topic: tema bastante relevante para academia;

Índice *M* > 2,0: tema saturado.

Para a avaliação do tema em estudo, foram aplicadas as palavras-chaves: (“*mathematical models*” or “*probability*” or “*accident statistic*”) and (“*highway safety*” or “*road safety*” or “*traffic accidents*” or “*crash\**” or “*road accidents*”) and (“*pavement*” or “*mixture design*” or “*asphalt*” or “*friction\**” and “*texture*” or “*rubber friction*” or “*tire road interaction*” or “*drainage*” or “*microtexture*” or “*design*” or “*surface*”) na base de dados *Web of Science*.

Os resultados da primeira aplicação apresentaram 642 publicações entre o período de 1993 a 2022 e h-index com valor de 54. Conforme apresentado na Figura 7, a seguir:

Figura 7 - Relatório de citações: Aplicação de palavras-chaves



Fonte: *Web of Science* (2022)

Após a seleção e filtragem dos artigos, foram obtidas 162 publicações no período de 1993 a 2022 e h-index com valor igual a 32 (Figura 8):

Figura 8 - Relatório de citações: Seleção de artigos



Fonte: *Web of Science* (2022)

Com o valor de h-index igual a 32 e  $N = 29$  anos (1993 a 2022), foi obtido valor o índice M igual a 1,03, classificando o tema do presente estudo como *hot topic*, isso é, o tema apresenta bastante relevância para a academia.

A partir da relação entre a análise das redes e os resultados dos indicadores bibliométricos, observa-se a importância em utilizar a técnica bibliométrica para identificação dos autores e pesquisas mais relevantes na área de Sistemas Seguros, construindo um melhor embasamento e fundamento teórico nessa linha de pesquisa.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão abordados conceitos acerca da aderência neu-pavimento como um indicador de desempenho para Segurança Viária na infraestrutura das vias. A abordagem de sistemas seguros será explorada como maneira de apresentar a interação entre comportamento dos usuários, características dos veículos e das vias, compreendo que o sistema viário deve ser projetado como premissa que a falha humana vai ocorrer, porém a ocorrência de lesões graves e/ou fatais deve ser evitada. Estão presentes na discussão



estudos referentes aos componentes atuantes da força de atrito, equipamentos de medição de atrito e textura, os métodos e técnicas de quantificação deste indicador e características das misturas asfálticas. Por fim, serão expostos alguns modelos estatísticos preditivos de acidentes, destacando o modelo de previsão de acidentes e o método “antes e depois” do manual *Highway Safety Manual* (HSM) para análise da efetividade de um tratamento em um determinado período de análise.

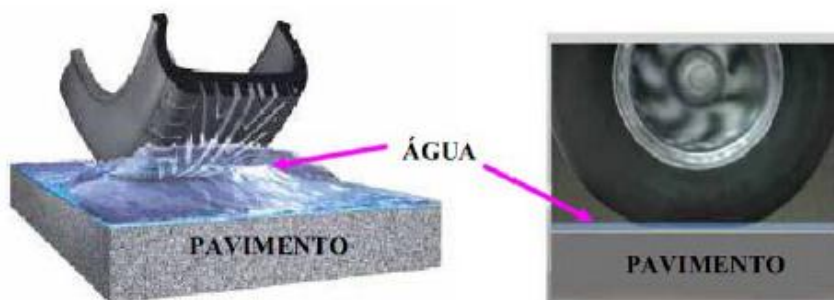
### 3.1 INTERAÇÃO PNEU-PAVIMENTO

A interação pneu-pavimento depende principalmente da qualidade superficial do pavimento e do pneu do veículo. O coeficiente de atrito representa a condição de aderência entre esses dois componentes, sendo o seu valor influenciado por um conjunto de fatores, sejam eles climáticos (temperatura e precipitação), estado do pneu, velocidade de operação do veículo e pelas características do pavimento (Pinto, 2003). Como pode ser visto na Figura 9, alguns fatores ambientais influenciam na perda da aderência entre pneu e pavimento. Em condições chuvosas, as forças hidrodinâmicas operantes excedem as forças exercidas pelo pneu, fazendo com que o mesmo flutue sobre uma pequena lâmina d'água, levando a perda de controle do veículo, fenômeno conhecido como aquaplanagem ou hidroplanagem, que reduz significativamente a área de contato entre o pneu-pavimento.

Segundo Mounce *et al.* (1993), dentre as causas principais que influenciam no fenômeno da aquaplanagem estão:

- Pneu do veículo: tipo, pressão de inflação, ranhuras e qualidade da área de contato;
- Pavimento: textura e drenagem superficiais;
- Condições ambientais: precipitação e altura da lâmina d'água;
- Comportamento do condutor: habilidade e velocidade de tráfego.

Figura 9 - Interação pneu-pavimento



Fonte: Silva (2008).

### 3.1.1 Mecanismos de aderência pneu-pavimento

A resistência à derrapagem é definida como a força que impede o movimento do pneu do veículo ao longo da superfície do pavimento. As condições de superfície interferem diretamente na interação pneu-pavimento e na força de atrito resultante. Esta é formada por dois componentes, apresentados como: coeficiente de atrito longitudinal e coeficiente de atrito transversal. Sendo o primeiro influenciando diretamente pelo potencial de frenagem, definido como a força gerada entre as superfícies de contato pneu-pavimento quando se arrasta uma roda travada por meio de um veículo trator no sentido longitudinal. Por sua vez, o segundo, trata-se da força perpendicular ao plano de rotação da roda, quando esta circula com um ângulo em relação à sua direção de avanço, ocasionando o fenômeno de derrapagem (PONCINO, 2001).

Por mais polidas que sejam estas superfícies no ponto de vista macroscópico, apresentam certo grau de rugosidade em uma análise microscópica. Intervir nas propriedades da superfície do pavimento para alcançar melhores condições de aderência, torna-se uma opção favorável para segurança nas rodovias (HALL *et al.*, 2009; SANTOS, 2004). Segundo Moore (1980), a degradação e desgaste entre as superfícies do pneu e pavimento é resultante dos mecanismos de dissipação de energia existentes entre essas superfícies.

O coeficiente de atrito adimensional pode ser definido como a força tangencial atuante entre a borracha da parte inferior do pneu e a superfície longitudinal do pavimento. A relação entre a força de atrito ( $F_a$ ) e a força normal (N) é representada pela Equação 3.

Equação 3 - Cálculo do coeficiente de atrito

$$\mu = \frac{F_a}{N} \quad (3)$$

Onde:

$\mu$  = coeficiente de atrito (adimensional)

$F_a$  = força de atrito

N = força normal

A força de atrito é denominada força de atrito estático, sendo sua constante de proporcionalidade o coeficiente de atrito estático ( $\mu_e$ ) que acontece quando a força aplicada não é suficiente para colocar o corpo em movimento.

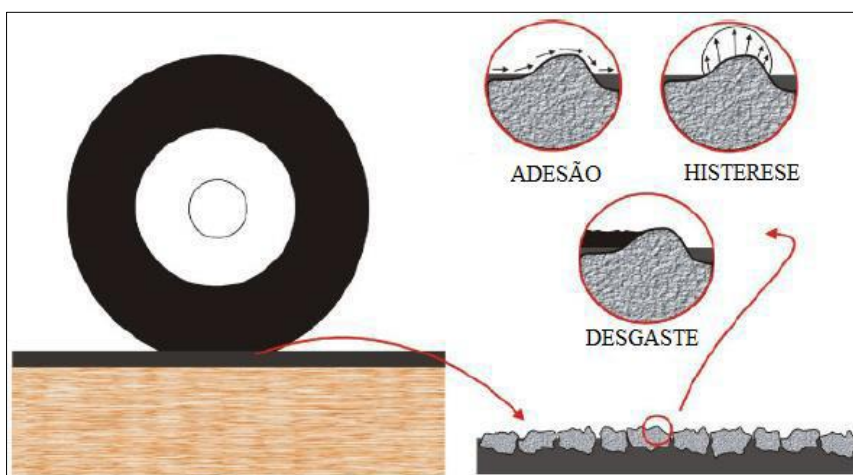
Por outro lado, quando se verifica o início do movimento entre as superfícies, inicia-se o coeficiente de atrito dinâmico ( $\mu_d$ ) que ocorre em função da existência de uma força denominada força de atrito cinético ( $F_n$ ). Ressalta-se que o coeficiente de atrito estático máximo é sempre superior ao coeficiente de atrito cinético ( $\mu_e \text{ max} > \mu_c$ ), ou seja, o valor máximo atingido pela força de atrito estático ocorre na iminência do movimento entre dois corpos, a chamada força limite de atrito.

Segundo Kokkalis e Panagouli (1998), a força de atrito é ocasionada pela combinação de dois mecanismos denominados: adesão e histerese, representados na Figura 10. A adesão é resultante das forças intermoleculares (Van der Waals) entre a borracha do pneu em contato com as partículas da superfície do pavimento. Por seu turno, o fenômeno da histerese é resultante da energia dissipada na deformação da superfície da borracha do pneu em contato com as irregularidades da superfície do pavimento.

O coeficiente de atrito por adesão depende principalmente das características dos materiais entre superfícies em contato, além de ser a principal componente responsável pelo atrito em pistas secas. Já o coeficiente de atrito por histerese não é afetado pela presença de água na superfície ou pela

presença de agentes contaminantes, por outro lado, aumenta conforme a velocidade de deslizamento, atingindo o seu valor máximo para maiores velocidades. Além disso, o desgaste resultante do rompimento da borracha do pneu pode contribuir na perda de atrito superficial (LUGÃO, 2008; ARAÚJO; 1994; ANDRESEN e WAMBOLD, 1999).

Figura 10 - Mecanismos de forças de atrito



Fonte: Adaptado de Andresen e Wambold (1999) *apud* Costa (2017)

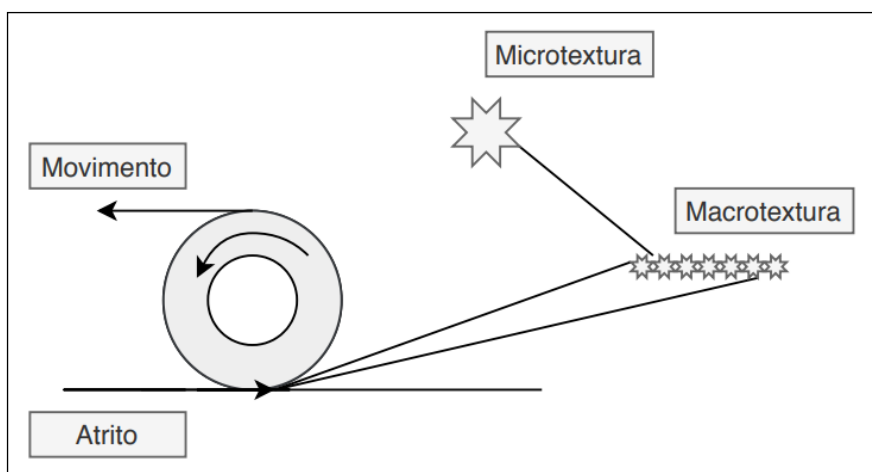
A resistência de rolamento de um pneu é provocada principalmente pela ação da histerese, que leva em conta as propriedades viscoelásticas do material utilizado no revestimento do pavimento. Foi observado que as perdas de atrito no rolamento de um pneu operando nas velocidades 120 e 150 km/h, foram entre 90 e 95% em função da histerese; 2 a 10% em função do atrito entre as superfícies do pneu e do pavimento, e 1,5 a 3,5% relativas à resistência do ar (RODRIGUES FILHO, 2006).

Segundo Aps (2006), os fatores que mais influenciam a resistência ao deslizamento podem ser divididos em duas categorias. A primeira é relacionada aos agregados; natureza ou textura de superfície; presença de água na pista; geometria da via; características do pneu; velocidade do veículo e intensidade do tráfego. A segunda categoria é associada ao tipo de revestimento; métodos de construção e manutenção da via; temperatura; sistema de freios e suspensão do veículo; carga por roda e presença de óleo na camada de rolamento.

### 3.1.2 Textura superficial

Segundo Noyce *et al.*, 2005, a aderência pneu-pavimento é uma propriedade resultante de duas características da superfície do pavimento: a microtextura e a macrotextura, conforme apresentado na Figura 11. A microtextura é uma propriedade que está associada à textura superficial dos agregados, como rugosidade e resistência ao polimento superficial. Já a macrotextura está relacionada ao conjunto de agregados mais ligante ou mástique dando características de superfície. Conforme Gillespie (1992), a componente de força de atrito por histerese está associada com a macrotextura da superfície do pavimento, enquanto o mecanismo de força de atrito por adesão é relacionado à microtextura do pavimento.

Figura 11 - Força de Atrito e suas propriedades



Fonte: Adaptado de Noyce *et al.* (2005)

A microtextura pode ser definida como a angularidade da aspereza superficial dos agregados, sendo uma característica fundamental para o aumento do coeficiente de atrito por adesão, devido ao entrosamento da rugosidade do agregado e do pneu em baixas velocidades de rolamento, de até cerca de 40 km/h. Em condições de pista molhada, a microtextura exerce um papel fundamental no rompimento da lâmina d'água entre as superfícies do pneu e pavimento (WAMBOLD *et al.*, 1995; BERNUCCI *et al.*, 2008). Nos estudos de Fwa e Ong (2008), foi observado que a área de contato entre pneu e pavimento não sofreram grandes alterações em um teste com elementos finitos às

velocidades inferiores a 36 km/h, concluindo que quanto maior a velocidade de tráfego, menor a área de contato pneu-pavimento.

A macrotextura é o principal fator que atinge diretamente a condição de aderência pneu-pavimento, principalmente em velocidades superiores a 50 km/h. Esta componente depende das características da composição granulométrica da mistura asfáltica, composição do ligante asfáltico, forma e angularidade dos agregados. Além disso, uma boa medida de macrotextura corrobora com a capacidade de escoamento na superfície do pavimento. Abaixo de 0,6 mm, a macrotextura passa a ter uma tendência de ser fechada e aumenta o risco de hidroplanagem, enquanto acima de 1,2 mm, a textura é muito aberta, causando desgaste excessivo de pneus, maior consumo de combustível e tendência a maior ruído ao rolamento (HENRY, 2000; BERNUCCI *et al.*, 2008).

A textura superficial do pavimento depende da medida das magnitudes na horizontal (comprimento de onda) e na vertical (distância entre dois picos na superfície do pavimento). A classificação da textura conforme a PIARC (*Permanent International Association of Road Congress*) foi definida em quatro níveis distintos de variação superficial: microtextura, macrotextura, megatextura e irregularidade. A *American Society for Testing and Materials* (ASTM E867-06, 2012) definiu os limites e os domínios de textura superficial conforme apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Classificação da textura de um pavimento

Domínio	Dimensão Horizontal	Dimensão Vertical
Microtextura	0,0 a 0,5 mm	0,0 a 0,2 mm
Macrotextura	0,5 a 50 mm	0,2 a 10 mm
Megatextura	5 a 50 cm	1 mm a 50 mm
Irregularidades	0,5 m a 50 m	1 mm a 20 cm

Fonte: (ASTM E867-06, 2012)

A megatextura é definida como o nível de variação superficial cujo comprimento de onda tem a mesma ordem que os sulcos do pneu do veículo, afetando diretamente no conforto do usuário que percebe esse tipo de textura por meio de trepidações do veículo no rolamento (WAMBOLD, 1995).


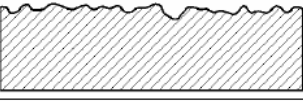


De um modo geral, a irregularidade está associada aos desvios de dimensões de magnitudes maiores do que a megatextura, interferindo na

resistência ao rolamento e na dinâmica do veículo, causando desconforto ao usuário da rodovia ao trafegar sobre um pavimento, podendo afetar também nos custos operacionais dos veículos (BERNUCCI *et al.*, 2008; ASTM E867-06, 2012).

A força de atrito e o escoamento superficial de um determinado pavimento podem ser identificados pela microtextura e macrotextura da superfície. Segundo Gillespie (1992), o mecanismo de força de atrito por histerese está relacionado com a macrotextura da superfície do pavimento, ao passo que a força de atrito por adesão é ligada à microtextura do pavimento.

Para este trabalho foram estudadas questões relativas à micro e à macrotextura por se tratar da aderência entre pneu-pavimento. De acordo com Aps (2006), as combinações de micro e macrotextura resultam em quatro classificações de textura, apresentadas a seguir na Tabela 2.

Tabela 2 - Tipo de superfície em função da classe de microtextura e macrotextura

Microtextura	Macrotextura	Superfície	Tipo de Textura
Rugosa	Aberta		Rugosa e Aberta
	Fechada		Rugosa e Fechada
Polido ou Lisa	Aberta		Polida e Aberta
	Fechada		Polida e Fechada

Fonte: Aps (2006)

### 3.2 METODOLOGIAS PARA MEDIÇÃO DE TEXTURA

Nesse item serão abordados os principais procedimentos para medição de macrotextura e atrito (microtextura) que são utilizados para a caracterização da superfície do pavimento.

### 3.2.1 Medição de atrito do pavimento

Segundo Poncino (2001), dentre diversos equipamentos para medição do coeficiente de atrito, estão os: estáticos e dinâmicos. Os equipamentos estáticos são conhecidos internacionalmente pela facilidade de operação e baixo custo. Os dinâmicos podem ser classificados como equipamentos de roda bloqueada, roda oblíqua, ou de roda parcialmente bloqueada.

#### 3.2.1.1 Medição de atrito com equipamento estático

- Pêndulo Britânico

O Pêndulo Britânico (Figura 12) é um equipamento de medição de coeficiente de atrito estático. Suas especificações são padronizadas pelo método ASTM E-303-93 (1998), podendo ser utilizado tanto para ensaios de campo, como de laboratório. A medição é feita ao lançar a haste do pêndulo com a sapata de borracha deslizando sobre o pavimento. O valor do coeficiente de atrito é expresso em BPN (*British Number Pendulum*) ou SRT (*Skid Resistant Test*).

Figura 12 - Pêndulo Britânico



Fonte: Lugão (2018)



No Brasil, o Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos do DNIT (2006), sugere valores mínimos de BPN (*British Number Pendulum*) superior a 55. A Agência de Transportes de São Paulo (ARTESP) determina classes de microtextura conforme a Tabela 3.

Tabela 3 - Classificação da microtextura com o Pêndulo Britânico (ABPV, 1998)

Classificação	Limites
perigosa	<25
muito lisa	25 - 31
lisa	32 - 39
insuficientemente rugosa	40 - 46
mediamente rugosa	47 - 54
rugosa	55 - 75
muito rugosa	> 75

Fonte: ABPV (1988)

### 3.2.1.2 Medição de atrito com equipamento dinâmico

- Equipamentos com roda bloqueada

Os equipamentos com roda bloqueada consistem na medição do *Lateral Friction Coefficient* (LFC) com bloqueio das rodas medidoras. O equipamento Adhera (Figura 13), de origem francesa, mede o coeficiente de atrito com uma taxa de deslizamento entre 0 e 100% e valores de velocidade entre 20 a 130 km/h, com espessura da lâmina d'água de 0,5 mm a 3 mm.

Figura 13 - Equipamento Adhera



Fonte: Wambold e Henry (2002)

Outro equipamento com roda bloqueada é o denominado trailer ASTM E-274 (Figura 14), de origem norte-americana, é instalado em um trailer e é rebocado pela traseira do veículo, opera numa velocidade de até 65 km/h, com

espessura da lâmina d'água de até 0,5 mm. As medições podem ser repetidas após a roda atingir o estado de rolamento livre novamente.

Figura 14 - ASTM E-274



Fonte: Wambold e Henry (2002)

- Equipamentos com roda oblíqua

### SCRIM

Os equipamentos com ângulo de deslizamento lateral medem o coeficiente de atrito transversal, nos quais a roda se situa num plano que forma um ângulo com a direção de avanço. O SCRIM (Sideway force Coefficient Routine Investigation Machine), apresentado na Figura 15, opera com um ângulo de inclinação de  $20^\circ$  em relação ao eixo longitudinal do veículo, numa velocidade máxima de 50 km/h e espessura de filme d'água de 0,5 mm, com intervalo de medição superior a 10 m.

Figura 15 - SCRIM



Fonte: Wambold e Henry (2002)

### Mu-meter

O equipamento Mu-meter (Figura 16) é o mais utilizado no Brasil em pistas de aeroportos, é composto por um sistema de três rodas, sendo duas para medição do coeficiente de atrito e a terceira para medição das distâncias percorridas. Trabalha com um ângulo de convergência de aproximadamente  $7,5^\circ$  e velocidade de operação de 65 km/h. O coeficiente de atrito é medido através da medida da força lateral nos eixos de duas rodas lisas, denominadas *Friction Wheels* (FW). As medições podem ser feitas em pistas secas e molhadas. O procedimento de aferição está descrito na ASTM E-670 (2000).

Figura 16 - *Mu-meter* MK6



Fonte: Wambold e Henry (2002)

- Equipamentos com roda parcialmente bloqueada

O *grip-tester* (Figura 17) realiza a medição de atrito contínuo, com deslizamento fixo, pelo qual opera com uma parcela de roda bloqueada, e atinge até 65 km/h. É formado por um reboque de três rodas, sendo que a roda central mede o coeficiente de atrito, com rotação retardada, operando com 15% das rodas bloqueadas.

Figura 17 – Grip-tester



Fonte: A autora (2022)

### 3.2.2 Medição da macrotextura

A medição da textura superficial do pavimento pode ser realizada por três métodos: método volumétrico, perfilômetro e drenômetro. Nesta seção, serão listados alguns ensaios mais comumente utilizados no Brasil.

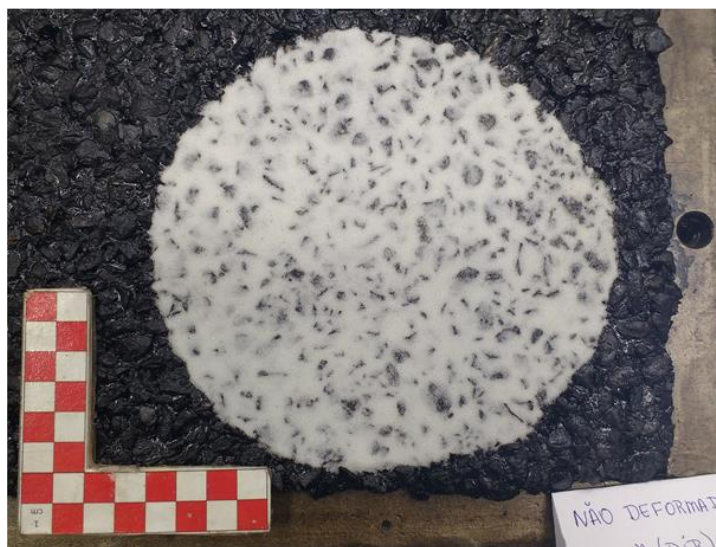
#### 3.2.2.1 Método volumétrico

- Mancha de areia

O ensaio de mancha de areia é especificado pela norma ASTM E965 - 15 (2015) e tem como objetivo determinar a profundidade média da altura da mancha de areia na superfície de pavimentos. É um dos métodos mais utilizados para obtenção da macrotextura devido a sua praticidade e baixo custo. Além disso, assim como o ensaio de atrito utilizando pêndulo britânico, o ensaio de mancha de areia fornece resultados pontuais da textura da superfície do pavimento. Atualmente, vem sendo utilizadas micro-esferas de vidro passantes na peneira de abertura 0,25 mm e retidas na peneira de abertura de 0,18 mm.

Recomenda-se espalhar um volume de 25.000 mm<sup>3</sup> com o auxílio de um pistão circular, preenchendo os vazios da textura do pavimento em movimentos circulares. Obtendo-se uma geometria final com formato aproximadamente circular (Figura 18). Em aeroportos foi criado o método da mancha de graxa, entretanto, para rodovias a mancha de areia é a mais empregada.

Figura 18 - Mancha de areia, utilizando micro-esferas de vidro



Fonte: Carvalho (2019)

No fim do ensaio, mede-se o diâmetro do círculo obtido em quatro posições diferentes e obtém-se um diâmetro médio. A profundidade média é calculada pela Equação 4.

Equação 4 - Cálculo da profundidade média da mancha (mm)

$$HS = \frac{V \cdot 4}{Dm^2 \cdot \pi} \quad (4)$$

Onde:

HS: profundidade média da mancha (mm)

V: volume de micro-esferas (mm<sup>3</sup>)

Dm: diâmetro médio do círculo (mm)

No Brasil, a ANAC (IAC-4302), recomenda que a granulometria da areia utilizada no ensaio esteja entre as peneiras de abertura 0,300 mm (n°50) e a peneira de abertura 0,150 mm (n°100). Segundo o Manual de Restauração de pavimentos Asfálticos (DNIT, 2006), a profundidade média obtida no ensaio de mancha de areia é utilizada na classificação quanto a macrotextura, como pode ser observado na Tabela 4.

Tabela 4 - Classes de microtextura pelo método da Mancha de Areia

Classificação	Limites HS
Muito Fina	< 0,20
Fina	0,21 - 0,40
Média	0,41 - 0,80
Grossa	0,81 - 1,20
Muito Grossa	> 1,20

Fonte: DNIT (2006)

O manual do DNIT (2006) recomenda a aplicação de revestimentos para altura média da mancha de areia de  $0,6 \text{ mm} < \text{HS} < 1,2 \text{ mm}$ , isso significa, superfícies com textura média a grossa. O manual também chama a atenção em relação aos ruídos em texturas com HS superior a 1,20 mm, gerando desconforto aos usuários da via.

### 3.2.2.2 Perfilômetro Laser

O perfilômetro a laser é um equipamento utilizado para medição da macrotextura da superfície do pavimento. Trata-se de um equipamento constituído por módulos lasers, sensores de aceleração vertical e de deslocamento longitudinal, integrados por microcontroladores, podendo ser acoplado em veículos que realizam as medições simultaneamente e tem sua operação gerenciada por um computador portátil (APS, 2006). Ao final, obtém-se o *Mean Profile Depth* (MPD) que, por sua vez, pode ser utilizado no cálculo do *Mean Texture Depth* (MTD), que corresponde ao valor aproximado da macrotextura. O procedimento de ensaio é descrito na norma da ASTM E1845 – 15 (2015).

### 3.2.2.3 Drenabilidade

Este método tem o intuito de avaliar a capacidade da macrotextura ao drenar a água que escoar na superfície do pavimento. Neste ensaio, utiliza-se um cilindro transparente denominado drenômetro e mede-se o tempo gasto para que certo volume de água escoar sob os vazios da macrotextura (ASTM – E2380M-15, 2019).

É possível correlacionar o resultado com o ensaio da mancha de areia, mas com algumas limitações em superfícies muito abertas ou muito fechadas (FERREIRA, 2002; APS, 2006). A unidade de medida é obtida em termos de tempo ou em vazão média da água de escoamento. A Figura 19 apresenta o drenômetro desenvolvido pelo Laboratório de Tecnologia de Pavimentação da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, com dimensões de volume igual a 0,73 litros, acoplado a um fundo com um orifício circular com diâmetro medindo duas polegadas.

Figura 19 - Drenômetro LTP-USP



Fonte: Aps (2006)

### 3.2.3 Harmonização das medições de atrito do pavimento

O atrito foi estudado pela primeira vez na década de 1920, com ensaios de derrapagem realizados no Aeroporto de *Le Bourget* em Paris (RODRIGUES FILHO, 2006). Devido à variedade de métodos e equipamentos para medição de

atrito e textura, faz-se necessário harmonizar esses resultados. Diante disso, foi desenvolvido um índice denominado *International Friction Index* (IFI) que consiste em avaliar em uma escala de “péssima” a “ótima” as condições de textura e atrito da superfície do pavimento. O IFI faz a combinação dos valores de microtextura e macrotextura, fornecendo um valor harmonizado de aderência pneu-pavimento.

• *International Friction Index* (IFI)

O IFI é determinado em função da micro e macrotextura do pavimento e faz a relação do atrito com a velocidade de deslocamento. Esse índice foi desenvolvido pela *PIARC (Permanent International Association of Road Congress)* por meio de uma experiência internacional de comparação e harmonização de métodos de medidas e textura em diversos tipos de pavimentos. A partir dos resultados desta pesquisa, padronizou-se as políticas de gerência de pavimentos em diferentes países (APS, 2006).

No cálculo do IFI estima-se a constante de velocidade ( $S_p$ ) e o atrito harmonizado para a velocidade de 60 km/h (F60), considerando um veículo de passeio com pneus lisos e rodas travadas. O valor da constante de velocidade ( $S_p$ ) é obtida pela Equação 5.

Equação 5 - Cálculo da constante de velocidade

$$S_p = a + b \cdot T_x \quad (5)$$

Onde:

$S_p$  = constante de velocidade (adimensional);

$a$  e  $b$  = constantes determinadas no experimento do PIARC referentes à parcela do equipamento (adimensional);

$T_x$  = macrotextura (mm).

O valor de atrito é ajustado em função da macrotextura para uma velocidade de deslizamento 60km/h conforme Equação 6.



Equação 6 - valor de atrito ajustado para a velocidade de 60 km/h;

$$FR_{60} = FRS \cdot e^{(S-60)/S_p} \quad (6)$$

Onde:

$FR_{60}$  = valor de atrito ajustado para a velocidade de 60 km/h;

$FRS$  = valor de microtextura obtido com um dos equipamentos homologados;

$S$  = velocidade de referência para o tipo de equipamento;

$S_p$  = constante de referência de velocidade.

Na última etapa, calcula-se, o atrito harmonizado em função da medida de atrito ajustada para a velocidade de 60 km/h ( $FR_{60}$ ) e da medida de macrotextura ( $T_x$ ), conforme apresentado na Equação 5.

Equação 7 - Cálculo do valor de atrito harmonizado em função de  $FR_{60}$

$$F_{60} = A + B \cdot FR_{60} + C \cdot T_x \quad (7)$$

Onde:

$F_{60}$  = valor do atrito harmonizado em função de  $FR_{60}$  (adimensional);

$A$ ,  $B$  e  $C$  = constantes de calibração determinadas pelo equipamento utilizado na medição de microtextura (adimensional);

$FR_{60}$  = valor do atrito ajustado para a velocidade de 60 km/h (adimensional); e

$T_x$  = macrotextura (mm).

Os valores das constantes de calibração  $A$ ,  $B$  e  $C$  e o valor da velocidade de cada equipamento ( $S$ ) vai depender do equipamento selecionado para medição da microtextura que pode ser consultado nos modelos da PIARC (ASTM E 1960-98, 1998).

O  $F_{60}$  e o  $S_p$  são os valores previstos e calibrados para o atrito e para a velocidade, respectivamente. Segundo Aps (2006), comumente aplica-se o par de valores  $F_{60}$  e  $S_p$  para representar o IFI de um pavimento: IFI ( $F_{60}$ ;  $S_p$ ). Pela

Equação 8 pode-se definir o valor IFI em qualquer velocidade de deslocamento (S).

Equação 8 - valor do atrito harmonizado para uma determinada velocidade

$$FS = F_{60} \cdot e^{(60-S)/S_p} \quad (8)$$

Onde:

FS = valor do atrito harmonizado para uma determinada velocidade;

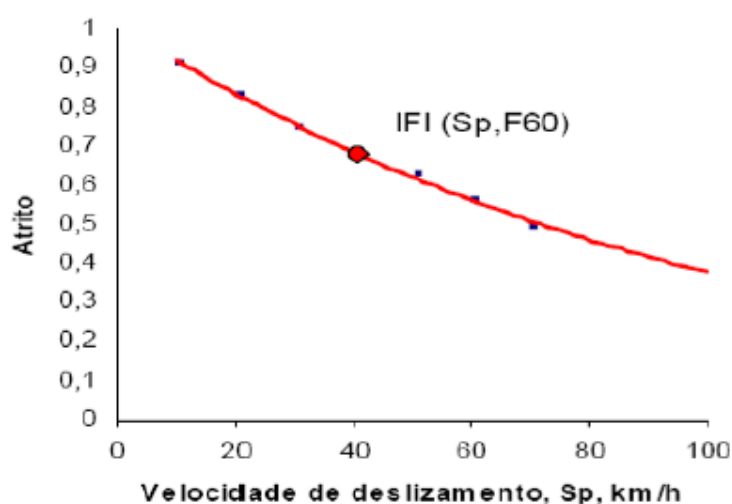
$F_{60}$  = valor do atrito harmonizado para velocidade de 60 km/h;

S = velocidade de deslocamento; e

$S_p$  = constante de referência da velocidade.

A partir do valor IFI pode-se traçar a curva de referência estimada para o valor de atrito em função da velocidade de deslocamento (APS, 2006). Conforme apresentado na Figura 20, quando o IFI para uma determinada velocidade não corresponder às especificações, os gestores responsáveis pela via podem, por exemplo, adotar medidas para segurança viária, como por exemplo, implantar placas de sinalização na pista para redução da velocidade em condições de pista molhada.

Figura 20 - Curva de referência do modelo IFI



Fonte: Aps (2006)

· Classificação do valor de IFI

As normas e recomendações das faixas admissíveis para o atrito em rodovias tem como objetivo garantir a segurança aos usuários. Além disso, vários estudos mostram o aumento no risco de acidentes quando os valores de atrito estão abaixo desse limiar. De um modo geral, órgãos fiscalizadores gerenciam a aderência pneu-pavimento em rodovias para o recebimento de novas obras ou em obras de manutenção e reabilitação rodoviária. No Brasil, Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT) exige relatórios trimestrais de análise de textura superficial de pavimentos por parte das concessionárias responsáveis pela rodovia.

O Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos do DNIT (2006) classifica os limites de atrito em uma escala de “péssima” a “ótima”. Na Tabela 5, apresenta-se a classificação IFI proposta por Aps (2006).

Tabela 5 - Faixas de classificação do IFI

Condição	Limites do IFI
Péssimo	<0,05
Muito ruim	0,06 a 0,08
Ruim	0,09 a 0,11
Regular	0,12 a 0,14
Bom	0,15 a 0,21
Muito Bom	0,22 a 0,35
Ótimo	> 0,35

Fonte: Aps (2006)

### 3.3 CARACTERÍSTICAS DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

O desempenho de um pavimento está associado ao conjunto de materiais constituintes na dosagem da mistura asfáltica e nas camadas subjacentes, como também, das condições de compactação e execução, ações do tráfego e do clima. Entre os principais aspectos das misturas asfálticas que interferem diretamente na textura superficial estão: a distribuição granulométrica dos agregados e fíler, natureza e forma das frações graúdas e características mineralógicas. Por sua vez, o ligante asfáltico tem uma parcela menor de contribuição para a textura superficial, que está relacionada à capacidade do

revestimento em resistir à degradação provocadas pelas ações de intempéries (APS, 2006). Segundo Bernucci *et al.* (2008), a distribuição granulométrica dos agregados das misturas asfálticas usinadas é uma das mais importantes características físicas. A subdivisão da graduação em algumas classes auxilia na percepção da atuação das misturas asfálticas, a saber:

- graduação densa ou bem-graduada: apresenta distribuição granulométrica contínua, na qual os grãos menores preenchem os vazios dos maiores. O concreto asfáltico (CA) é o tipo de mistura mais empregada no Brasil.
- graduação aberta: apresenta distribuição granulométrica contínua, mas com deficiência de materiais finos que preenchem os vazios dos grãos maiores, resultando em maior volume de vazios. Recomenda-se utilizá-la em mistura asfáltica com características drenantes, conhecida como camada porosa de atrito (CPA).
- graduação com degraú ou descontínua: apresenta pequeno percentual de agregados com tamanhos intermediários, formando um patamar correspondente às frações intermediárias. São materiais adequados a serem utilizados em misturas asfálticas, com foco em melhorar a deformação permanente. Exemplos: misturas sem agregados de certa graduação (*gap-graded*); e stone matrix asphalt (SMA).

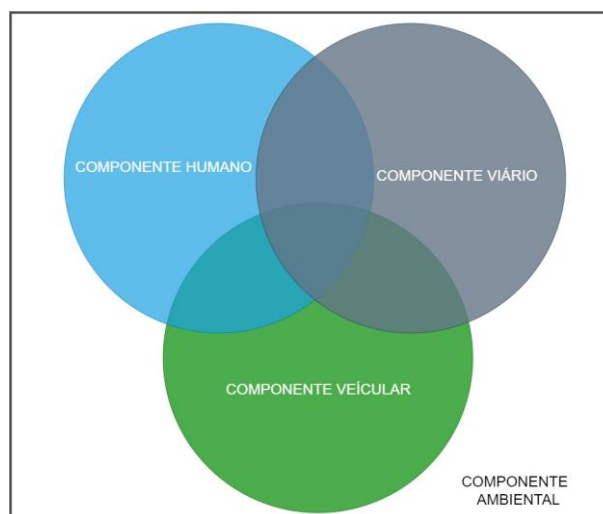
### 3.4 SISTEMAS SEGUROS

Os Sistemas Seguros podem ser definidos como um conjunto de ações e medidas com objetivo de garantir a proteção dos usuários dos sistemas de transportes, prevenindo a ocorrência de acidentes de trânsito. A abordagem tradicional busca focar no erro humano, enquanto a abordagem sistêmica concentra-se na prevenção de acidentes pelo qual tanto os projetistas e usuários da via são responsáveis (HALL *et al.*, 2009; SAFARPOUR *et al.*, 2020). Nesse item serão apresentados os principais fatores que influenciam o desempenho da segurança viária.

### 3.4.1 Principais causas de sinistros de trânsito

Nas primeiras teorias os acidentes viários eram caracterizados como eventos aleatórios, pelos quais o ser humano não poderia obter nenhum controle. A atual expressão “sinistros de trânsito” foi fundamentada pela Norma NBR 10697/2020 que substituiu “acidentes de trânsito”. Para atualização desta terminologia foi levado em consideração que tais sinistros podem ser prevenidos por meio de sistemas seguros. Conforme a teoria do sistema, os acidentes são eventos resultantes de falhas na interação entre várias partes de sistemas complexos (ELVIK *et al.*, 2009). Segundo o DNIT (2010), o acidente de trânsito é definido como um evento aleatório ou não, que depende das relações das variáveis do homem, do veículo, da via e demais elementos eventuais. De um modo geral, as causas relacionadas aos acidentes de trânsito estão associadas à combinação de múltiplos fatores. Dentre eles, destacam-se: o comportamento do condutor, as condições do veículo e a infraestrutura das vias. O tráfego rodoviário é um sistema pelo qual esses componentes interagem entre si, sendo a ocorrência de um acidente concebida como uma “falha” desse sistema (Ogden,1996). O diagrama apresentado na Figura 21 representa de forma esquemática, a interação resultante da combinação dos fatores que influenciam na ocorrência de acidentes, sendo o mesmo utilizado, inicialmente, nos estudos de acidentes de trânsito.

Figura 21- Interação entre os componentes causais de acidentes



Fonte: Adaptado de Nodari (2003)

Segundo o *Highway Safety Manual* – HSM (AASHTO, 2010), o componente humano relaciona-se aos motoristas que cometem erros frequentes devido às limitações nos aspectos físicos, perceptivos e cognitivos. Além disso, a atenção do motorista e a capacidade de processar certa quantidade de informações são limitadas. Ao decorrer dos anos, a concepção demonstrada no diagrama da Figura 21 evoluiu, por meio da abordagem dos sistemas seguros, fundamentada pela estratégia conhecida como Visão Zero.

O conceito de Visão Zero foi concebido em 1994 na Suécia e após três anos, o parlamento sueco aprovou uma Lei de Segurança de Trânsito Rodoviário que transformou a Visão Zero em um projeto de lei, partindo do princípio de que é inaceitável perder vidas em incidentes de trânsito. Desde então, a Suécia registra uma das taxas mais baixas de mortalidade no trânsito no mundo (ITF, 2016). De forma resumida, os sistemas seguros devem ser desenvolvidos levando em conta a falha humana. Nesse contexto, evitar acidentes torna-se o principal foco e responsabilidade da engenharia a fim de proporcionar tráfego seguro aos usuários do sistema de transportes. Enquanto as políticas e campanhas de segurança viária se direcionam no comportamento humano, a Visão Zero busca enxergar as causas que geram problemas de insegurança nas vias (ITF, 2016).

Em relação ao componente viário, além de apresentar adequado projeto geométrico, boas condições superficiais do pavimento e de sinalização, buscase projetar ambientes rodoviários atendendo as expectativas do motorista que auxiliem na tomada de decisão quando algum obstáculo na pista for detectado (AASHTO, 2010). As estratégias para melhorias na Segurança Viária são classificadas como reativas e proativas. Sendo a primeira, correspondente às ações corretivas, ou seja, ações tomadas após ocorrência do acidente. Nesse aspecto, o sistema de gerência depende da necessidade da ocorrência do acidente para realizar a intervenção na via. Já as estratégias proativas, de caráter preventivo, são medidas adotadas para identificação de pontos críticos que apresentem elevado potencial para ocorrência de acidentes. Ambas têm apresentado resultados satisfatórios (Nodari, 2003). Nesse contexto, a avaliação da aderência pneu-pavimento se enquadra na estratégia proativa de gerência da segurança viária. Por meio dos ensaios de medição do coeficiente de atrito, é possível simular em condições adversas, o desempenho da camada de

rolamento do pavimento. Nas próximas seções serão apresentadas as principais características das vias que influenciam na ocorrência de acidentes rodoviários.

### **3.4.2 Influência dos elementos viários na ocorrência de acidentes**

A condição superficial da via é fundamental para manter boa aderência pneu-pavimento. À medida que o pneu solicita esforço ao pavimento, as forças de atrito contribuem para a trafegabilidade do veículo, como também no desempenho da frenagem e aceleração. Assim como as condições superficiais do pavimento, outras características, como um traçado geométrico consistente, devem proporcionar segurança ao condutor, no intuito de evitar a ocorrência de acidente por meio de falha cometida pelo motorista. Segundo Hall *et al.* (2009), o veículo deve ser operado em um ambiente seguro ou disposto de controles e regras que reduzam o risco de acidentes e as consequências causadas por eles. Ressalta-se que o enfoque desse estudo está na análise da condição da superfície viária.

#### **3.4.2.1 Condição superficial do pavimento**

O atrito entre a superfície do pneu e pavimento é um elemento relevante para segurança, relacionando o processo de projeto, execução, operação e manutenção das rodovias. Com o aumento da idade do pavimento, a condição antiderrapante do pavimento diminui com o tempo pelo efeito do polimento dos agregados, clima e ação do tráfego de veículos, aumentando o risco de sinistros de trânsito relacionados à derrapagem (LI *et al.*, 2017). O efeito das condições climáticas e temperatura atuam diretamente na efetividade das misturas asfálticas e na qualidade da aderência pneu-pavimento, devido às propriedades viscoelásticas do ligante asfáltico. Em condição de pista molhada, a aderência pneu-pavimento reduz significativamente. Estudos anteriores constataram que as medições do coeficiente de atrito realizadas em períodos mais frios do ano são, em média, de 15 a 20% superiores em relação às executadas durante o verão. O aumento da temperatura causa redução da aderência pneu-pavimento por histerese (COLONY, 1992; HENRY, 2000 e WILSON, 2013).

A seguir serão apresentados alguns tipos de revestimentos asfálticos para efeito de caracterização dos materiais e sua influência em Sistemas Seguros.

### **Concreto asfáltico (CA)**

O concreto asfáltico é uma mistura com graduação densa e possui um bom arranjo estrutural que garante um adequado desempenho em pavimentos. Todavia, esse tipo de mistura é muito sensível a variação do teor de ligante asfáltico, caso se tenha cometido erros durante as etapas de projeto, de usinagem e no controle da compactação em campo, todos esses aspectos conjuntos poderão comprometer o desempenho da mistura em sua vida útil. Entre as patologias mais comuns são a deformação permanente e o trincamento por fadiga. Nesse sentido, vem sendo utilizado em substituição ao ligante convencional, ligante modificado por polímero ou asfalto-borracha para tornar o concreto asfáltico mais resistente e durável.

Em relação a textura superficial, o CA resulta em uma textura fechada por possuir curva granulométrica mais aproximada da sua densidade máxima. As partículas finas geram uma macrotextura mais fechada, com altura da mancha de areia entre 0,4 e 0,5 mm (BERNUCCI *et al.*, 2008; APS, 2006).

### **Camada porosa de atrito (CPA)**

A camada porosa de atrito (CPA), é um tipo de mistura asfáltica muito utilizada em pista de decolagem de aeroportos, possui graduação aberta, com elevado teor de vazios de ar (entre 18 e 25%). Esses vazios permitem que a água decorrente da precipitação se infiltre pelo revestimento e percole em seu interior até sair pelas bordas. Os revestimentos asfálticos drenantes por apresentarem textura superficial mais aberta, aumentam o coeficiente de atrito, mesmo em circunstâncias de tráfego pesado e em períodos chuvosos. Melhores condições de drenabilidade do revestimento asfáltico, contribuem para redução dos efeitos “*splash e spray*” que são provocados a partir da água acumulada na superfície do pavimento. A expulsão da água para o ar, provocada pela ação dos pneus dos veículos, sob a forma de gotículas, que são pulverizadas, produz uma nuvem de partículas d’água. Esse efeito pode ocasionar a perda de controle do veículo



pelo usuário da via, aumentando o risco de acidentes (RUNGRUANGVIROJN e KANITPONG, 2010).

Outro fator importante é que esse tipo de revestimento possui um alto potencial para redução de ruído ao rolamento por conta da absorção do som entre os vazios da mistura e a eliminação de bombeamento de ar entre a superfície pneu-pavimento (FERREIRA, 2002; HOMEM, 2002; BERNUCCI *et al.*, 2008).

### **Stone matrix asphalt (SMA)**

O SMA é uma mistura que possui graduação descontínua caracterizada por conter uma elevada quantidade de agregados graúdos, proporcionando maior interação grão/grão. Os vazios no esqueleto mineral são preenchidos por um mástique asfáltico de elevada viscosidade (BERNUCCI *et al.*, 2008). São misturas que tendem a ser impermeáveis com volume de vazios entre 4 a 6%. A vantagem em se optar por utilizar o SMA está em se obter uma mistura que apresente um bom desempenho funcional, durabilidade, aumento do coeficiente de atrito, diminuição do ruído, e resistência à deformação permanente. Por conta da alta concentração de agregados graúdos, obtém-se macrotextura rugosa e com formação de pequenos “canais” entre os grãos graúdos, que permite o escoamento superficial e melhor aderência pneu-pavimento em períodos chuvosos (VASCONCELOS, 2004; VALE, 2007).

### **Gap-graded**

O *gap-graded* é um tipo de mistura asfáltica com graduação descontínua densa que resulta em um macrotextura aberta e rugosa, mas sem elevado teor de vazios de ar (BERNUCCI *et al.*, 2008). Os benefícios relacionados à segurança viária são uns dos principais motivos para o uso do *gap-graded* em países da Europa (Holanda, França e Alemanha), Ásia (China, Japão e Coreia) e nos Estados Unidos. Gu *et al.* (2018) explicam que o *gap-graded* deve fornecer melhores resultados ao longo do tempo, uma vez que a macrotextura aberta fornece maior coeficiente de atrito em altas velocidades. Adicionalmente, em um estudo de caso realizado em Las Vegas, observaram que o *gap-graded* apresentou maior resistência à derrapagem quando comparado ao CA,

entretanto, obteve-se maior custo inicial no processo construtivo e um aumento do custo de manutenção. Por fim, os autores concluíram que há uma necessidade urgente de revisar esses estudos a fim de avaliar a eficácia da segurança da aplicação desse tipo de mistura.

Lyon *et al.* (2018) conduziram um estudo em grande escala para quantificar o efeito do *gap-graded* para segurança nas estradas. Foram coletados dados de acidentes em pavimentos revestidos com *gap-graded* e em pavimentos convencionais na Califórnia, Minnesota, Carolina do Norte e Pensilvânia. Nessa análise, os autores observaram que o *gap-graded* foi eficaz na redução da taxa de acidentes em condições de pista molhada, porém apresentou um aumento da taxa de acidentes em condições de pista seca.

O volume de vazios do *gap-graded* permite a drenagem superficial da água da superfície do pavimento, resultando em uma maior resistência à derrapagem. Por outro lado, os raios solares, o ar e a água podem penetrar mais facilmente no interior desses vazios presentes na mistura que aceleram o processo de envelhecimento do ligante de asfalto, tornando o pavimento menos durável (Hall *et al.*, 2009). Nesse sentido, busca-se utilizar nesse tipo de mistura ligantes modificados com polímero ou asfalto-borracha para aumentar o desempenho de suas propriedades mecânicas.

### **Tratamentos Superficiais**

Os tratamentos superficiais são revestimentos executados (sem mistura prévia) pelo espalhamento em camadas sucessivas de ligante asfáltico e agregado com dimensões similares, com posterior compactação que garante o recobrimento parcial e a adesão entre agregados e ligantes. Trata-se de um método que pode ser utilizado para restauração de pavimentos que não apresentam defeitos estruturais (BERNUCCI *et al.*, 2008). Os tratamentos superficiais são classificados em: tratamento superficial simples (TSS), tratamento superficial duplo (TSD), e tratamento superficial triplo (TST).

### Tratamento superficial simples (TSS)

São executados através da aplicação de apenas uma camada de ligante asfáltico e em seguida, efetua-se o espalhamento do agregado. Por serem camadas de desgaste não devem ser consideradas parte da estrutura do pavimento (BERNUCCI *et al.*, 2008)

### Tratamento Superficial Duplo (TSD)

São executados por meio da aplicação de duas camadas sobrepostas, cada uma composta por uma aplicação de ligante asfáltico e uma aplicação de agregado. Esse tipo tratamento superficial, resulta em uma textura superficial aberta, com alta resistência a derrapagem (APS, 2006; BERNUCCI *et al.*, 2008).

### Tratamento Superficial Triplo (TST)

São executados por meio da aplicação de três camadas, assim como no TSD, cada uma é constituída por uma aplicação de material asfáltico e uma aplicação de agregado (BERNUCCI *et al.*, 2008).

#### 3.4.2.2 Condições geométricas da via

O excesso de velocidade, quantidade de curvas, estado de conservação do pavimento, baixa visibilidade, são uns dos principais problemas relacionados à segurança viária em diversos países. Problemas com consistência de traçado podem ser identificados por meio de variações de velocidade de operação, alterações bruscas na trajetória de veículos, provocando a ocorrência de acidentes. Segundo Tretin (2007) um traçado consistente é aquele em que a geometria da via é compatível com a expectativa do motorista a fim de garantir uma operação segura, sem provocar surpresas ao condutor do veículo. Nesse contexto, avaliar a consistência de traçado permite propiciar alternativas que contribuam para a redução dos acidentes.

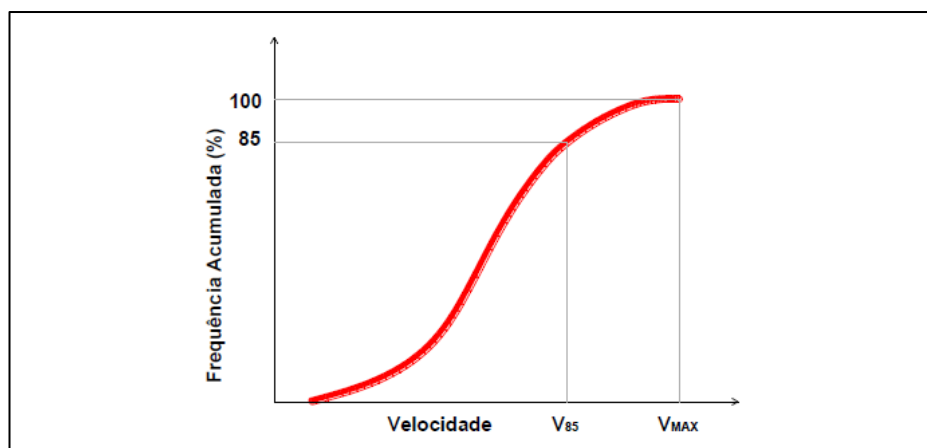
As etapas do desenvolvimento de um projeto geométrico consistem na definição das características básicas da via, tais como: quantidade e largura de faixas de

rolamento e acostamento, capacidade de tráfego, definição da velocidade de projeto e parâmetros como raio mínimo de curvatura, rampa máxima e superelevação máxima. Li *et al.*, (2017) verificaram que em curvas horizontais, o coeficiente de atrito reduz mais rapidamente quando comparados aos segmentos em tangente. Dentre as características citadas, a velocidade de projeto está associada diretamente ao condutor, ao veículo e a rodovia, tornando-se imprescindível na garantia de uma operação de tráfego segura.

A velocidade operacional é a velocidade adquirida pelo motorista por meio da combinação de elementos geométricos e do ambiente em seu entorno. Em muitos casos, a velocidade operacional não tem uma relação lógica com a velocidade de projeto e essa inconsistência pode agravar a condição de risco de acidentes viários.

De forma prática, a velocidade operacional é representada pelo percentil 85 (V85) da distribuição de velocidades observadas, obtido pela curva de distribuição de frequência acumulada, conforme apresentado no Gráfico 1. Segundo o Departamento de Estrada e Rodagem (DER, 2006), o 85º percentil possui uma forte relação com a segurança viária, uma vez que diversos estudos demonstram que motoristas operando em velocidades superiores ao V85 apresentam maior envolvimento em acidentes de trânsito quando comparados aos que conduzem com velocidades menores ou iguais a este valor. Desse modo, o estudo da velocidade operacional é fundamental na determinação da velocidade limite e na análise de consistência de traçado em projeto geométrico.

Gráfico 1 - Curva de distribuição de frequência acumulada e velocidades com indicação da velocidade operacional (V85)



Fonte: DER (2006)

No Brasil, o estudo de caso proposto por Torres (2015), compreendendo um trecho de 10 km de extensão localizado na Rodovia Régis Bittencourt (BR-116), indica que a falta de consistência no projeto geométrico é uma das principais causas de ocorrência de acidentes. Diante disso, a velocidade operacional foi considerada o parâmetro mais expressivo do comportamento do condutor. Além disso, notou-se que os trechos que apresentaram problemas de consistência correspondiam aqueles com maior quantidade de acidentes. Hassan et al., (2004) identificaram a importância de o estudo do traçado geométrico corresponder às expectativas do motorista. Um projeto consistente pode garantir que os elementos geométricos sucessivos sejam coordenados de maneira a minimizar a variabilidade na velocidade do veículo, evitando manobras críticas de direção e reduzindo os riscos de colisão. A avaliação e melhoria da consistência são, portanto, uma das várias ferramentas promissoras que podem ser empregadas para melhorar o desempenho da segurança nas rodovias.

### 3.5 MODELOS DE PREVISÃO DE ACIDENTES

Segundo Hauer (2002), os modelos de previsão de acidentes (MPA) buscam quantificar, por meio de técnicas estatísticas, o valor esperado de acidentes em um determinado local, sendo um dos principais objetivos trazer melhorias nas análises para segurança viária. Desse modo, quanto maior for a frequência e a severidade de acidentes, menos segura é considerada a via. Dentre os diversos modelos existentes, os mais populares e eficientes foram baseados na distribuição de Poisson e na distribuição binomial negativa, por apresentarem em seus resultados valores aproximados do quantitativo real de acidentes. A distribuição de Poisson surgiu como um ponto de partida para aplicação dos números de acidentes como inteiros não negativos. A partir disso, a distribuição binomial negativa propôs uma extensão do modelo de Poisson, que possibilita a análise dos casos em que os acidentes apresentam um padrão com elevada dispersibilidade (FHWA, 2000; HARWOOD *et al.*, 2000, HASSAN *et al.*, 2004). No entanto, segundo Lord (2006), a aplicação desses modelos pode ter algumas restrições, como por exemplo, a distribuição binomial negativa não se adequa bem ao lidar com a dispersão de parâmetros para conjuntos de amostragem

pequenos e médios. Já na distribuição de Poisson, observou-se que os resultados apresentaram valores enviesados para pequenas amostras.

Devido à ampliação do conhecimento sobre segurança viária, novas metodologias de avaliação da segurança vêm sendo incorporadas aos Modelos de previsão de acidentes. Inicialmente, as análises de acidentes eram empregadas de forma simplificada a partir do histórico de acidentes ocorridos em uma região, sem incluir uma análise estatística preditiva das ocorrências. O emprego direto dos índices de acidentes pressupõe uma relação linear entre frequência e as medidas de exposição destes acidentes. Todavia, percebeu-se que na maioria dos casos, estas relações apresentam comportamento não-linear (AASHTO, 2010).

Ao longo do tempo, o número de acidentes em um determinado local, segue uma tendência de variação convergindo a um valor médio em longo prazo, conhecido como fenômeno de retorno à média (AASHTO, 2010). O acidente é considerado um evento de caráter aleatório, isto é, a frequência de acidentes em curto prazo não corresponde a uma estimativa confiável a longo prazo. Desse modo, os estudos realizados a partir de relações de causa e efeito correm um grande risco de incidir em imprecisões significativas, podendo ocorrer uma superestimativa do efeito da intervenção em relação à redução de acidentes. Para diminuir o grau de aleatoriedade em relação ao número de acidentes observados, têm se destacado os modelos estatísticos de regressão, conhecidos como modelos de previsão de acidentes (MPA).

Dentre diversos trabalhos existentes na literatura relacionados às técnicas estatísticas para o emprego de modelos preditivos, neste estudo será abordado o modelo desenvolvido nos Estados Unidos, em 2010, pela *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO), na primeira edição do *Highway Safety Manual*, que pode ser calibrado, aplicado e adequado para diferentes regiões. Esse modelo foi lançado com o intuito de estimar a frequência de acidentes em nível de projeto ou em nível operacional da rede rodoviária.

Por meio das análises de um conjunto de dados de acidentes ocorridos em um determinado trecho viário, é possível determinar padrões estatísticos previsíveis. As Funções de Desempenho de Segurança (SPF's, do termo em inglês *Safety Performance Functions*), estimam o número total de acidentes conforme o grau

de severidade, levando em conta as condições específicas da região. Para aprimorar os resultados obtidos no modelo, o manual do HSM utiliza o método empírico de Bayes (EB). Segundo Silva (2011), o método EB pode ser aplicado para relacionar a estimativa do modelo estatístico com a frequência de acidentes observados, tornando-se uma boa ferramenta de compensação do viés do fenômeno de retorno a média, como também do viés causado pelos diferentes graus de dependência entre os fatores de modificação (CMF'S, do termo inglês *Crash Modification Factors*) (AASTHO, 2010).

### 3.5.1 Modelo do Highway Safety Manual

O Modelo de Previsão de Acidentes estabelecido pelo *Highway Safety Manual* (HSM) é voltado para profissionais que conduzem o estudo da Segurança Viária do setor de transportes. O modelo do HSM surgiu pela necessidade de apresentar as análises de Segurança Viária em um único documento oficial, e assim definir os procedimentos de segurança em rodovias estadunidenses. O modelo do HSM pode ser aplicado para os seguintes casos (AASHTO, 2010):

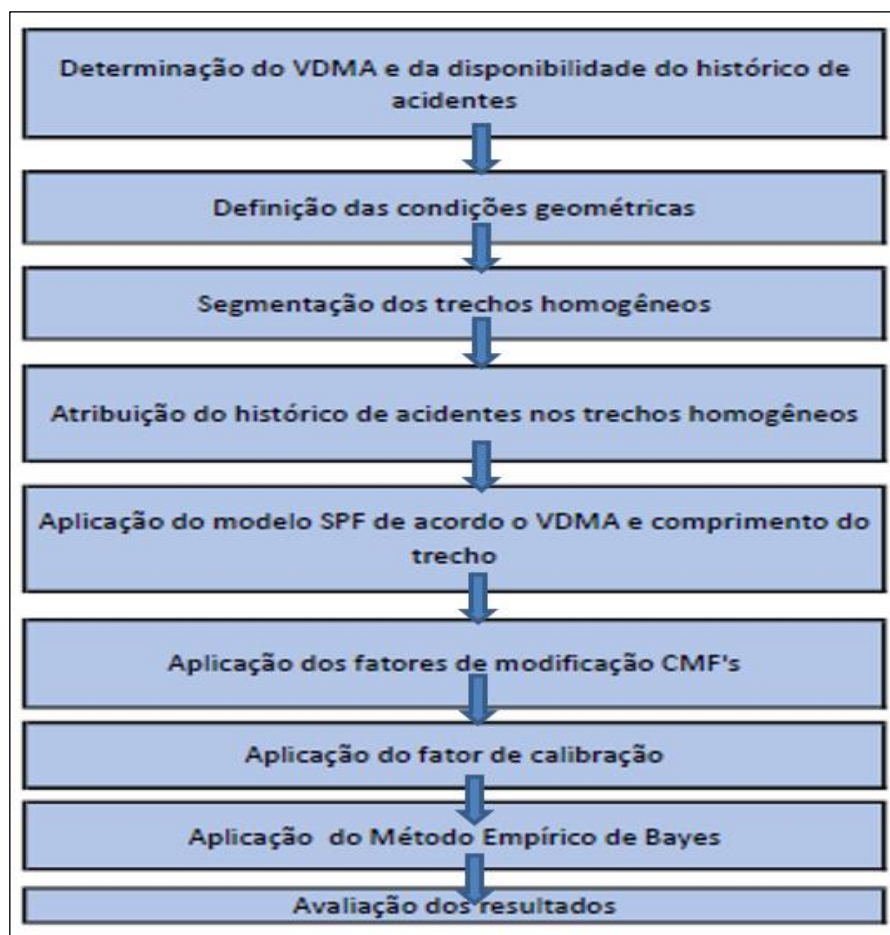
- Identificação dos locais de grande potencial para redução do número de acidentes e severidade;
- Identificação dos fatores que contribuem para ocorrência de acidentes;
- Avaliação das vantagens da redução de acidentes;
- Avaliação do efeito das alternativas de projetos na frequência e severidade de acidentes;
- Auxílio para tomada de decisões por planejadores na alocação de recursos para Segurança Viária.

A aplicação do HSM é feita para obtenção do número de acidentes previstos ( $N_{previsto}$ ) por meio de equações de cálculo denominadas *Safety Performance Function* (SPF) que são associadas aos fatores de modificação, os *Crash Modification Factors* (CMF), que são ajustáveis para cada característica da rodovia. Além disso, o modelo aplica fatores de calibração locais,  $C_x$ .

### 3.5.2 Método do HSM para previsão de acidentes em rodovias de pista dupla

O método do HSM foi desenvolvido para três classificações de rodovias (AASHTO, 2010): rodovias de pista simples; rodovias de pista dupla e vias arteriais urbanas e suburbanas. Para o estudo desta pesquisa será utilizado o modelo em rodovias de pista dupla (sentido único de tráfego) e segregada em toda sua extensão. As etapas de aplicação do modelo desenvolvido pela AASHTO (2010) são apresentadas na Figura 22.

Figura 22 - Etapas de aplicação do modelo HSM



Fonte: Adaptado de AASTHO (2010)

A metodologia aplicada em rodovias de pista dupla no manual do HSM segue os seguintes parâmetros:



- Rodovias de pista dupla sem divisão central: consiste em duas faixas por sentido e com seção transversal contínua, sem nenhum tipo de segregação.
- Rodovias de pista dupla com divisão central: consiste em duas faixas por sentido separadas por uma distância simples ou segregação física ou desnível.

No modelo, estão inclusos todos os tipos de sinistros de trânsito envolvendo quaisquer tipos de veículos (motorizados e não motorizados) e pedestres. O método preditivo para estimar a frequência de acidentes, obtido no apêndice C do HSM, pode ser aplicado em trechos já existentes ou em projetos para construção de novos trechos, ou seja, a estimativa pode ser feita para frequência de acidentes ocorridos em um determinado período ou em projeções futuras (isto é, o que se espera que ocorra).

O VDMA (Volume Diário Médio Anual) pode ser determinado tomando como base uma série histórica do tráfego local ou por estimativa. Para definição das condições geométricas em rodovias de pista dupla, faz-se necessário estabelecer os critérios estabelecidos no modelo de regressão *SPF* que serão mostrados no item 3.5.5.

### **3.5.3 Grau de Severidade dos acidentes**

Com intuito de medir o grau de intensidade das lesões observadas nos acidentes de trânsito, aplicam-se escalas de classificação dos acidentes por nível de severidade. A escala KABCO, bastante divulgada internacionalmente, foi desenvolvida pelo Conselho Nacional de Segurança (*National Safety Council* - NSC) e utilizada amplamente nos Estados Unidos (AASTHO, 2010). De maneira geral, os acidentes “com vítima” representam as ocorrências da escala “KABC” e a escala “O” representa os acidentes “sem vítima”. A escala possui a seguinte classificação:

- K: Lesão fatal (resulta em morte);
- A: Lesão incapacitante (impede que a pessoa exerça atividades cotidianas, à exceção de um ferimento fatal);
- B: Lesão não incapacitante evidente (qualquer tipo de lesão, com exceção de um ferimento fatal ou lesão incapacitante);

- C: Possível lesão (qualquer lesão desde que não seja um ferimento fatal, lesão incapacitante);
- O: Somente danos materiais.

O modelo desenvolvido pelo HSM inclui métodos para associar a frequência estimada de acidentes em níveis de severidade e por tipos de acidentes de trânsito, por meio de distribuições padronizadas, porém o manual incentiva que agências locais apliquem parâmetros e escaladas de classificação próprias.

Dentre diversos estudos observados por Silva (2021), observa-se certo obstáculo em se identificar de forma clara, a influência da incorporação da escala de classificação por nível de severidade na características dos modelos estatísticos preditivos de acidentes.

#### **3.5.4. Determinação dos trechos homogêneos**

O modelo de previsão de acidentes é resultante do número de acidentes previstos em toda extensão da via em estudo, e que são divididos em trechos homogêneos, uma vez que os segmentos de uma rodovia podem variar em função de suas características físicas e fluxo de veículos. Antes da divisão dos segmentos, é preciso unir as principais informações em um banco de dados. Os principais elementos são: localização das faixas adicionais; marco quilométrico; localização das praças de pedágio; localização dos radares e dispositivos de iluminação; VDMA do período de estudo.

Os segmentos homogêneos são definidos como elementos viários individuais com características semelhantes. Segundo o Apêndice C do HSM, um novo segmento homogêneo tem início no centro de cada interseção ou em qualquer um dos seguintes casos:

- Início ou fim de uma curva horizontal;
- Ponto de interseção vertical (PIV) para uma curva vertical de crista;
- Início ou fim de uma faixa de ultrapassagem ou seção curta de quatro faixas;
- Tipo de acostamento;
- Início ou fim de uma faixa central de duas mãos para conversão à esquerda.

- Presença de divisão central;
- Alteração do VDMA; presença de radares e de dispositivos de iluminação.

Recomenda-se arredondar a largura da pista, conforme apresentado na Tabela 6, a largura do acostamento (Tabela 7) e a largura do canteiro central (Tabela 8) antes da determinação dos segmentos homogêneos.

Tabela 6 - Largura da faixa de rolamento

Largura da faixa de rolamento (m)	Arredondamento (m)
$L \leq 2,8$	2,74
$2,8 \leq L \leq 3,0$	2,90
$3,0 \leq L \leq 3,1$	3,05
$3,1 \leq L \leq 3,3$	3,20
$3,3 \leq L \leq 3,4$	3,35
$3,4 \leq L \leq 3,6$	3,50
$L > 3,6$	3,66

Fonte: Adaptado (AASTHO, 2010)

Tabela 7- Largura do acostamento

Largura do acostamento (m)	Arredondamento (m)
$L \leq 0,2$	0
$0,2 \leq L \leq 0,5$	0,35
$0,5 \leq L \leq 0,8$	0,65
$0,8 \leq L \leq 1,1$	0,95
$1,1 \leq L \leq 1,4$	1,25
$1,4 \leq L \leq 1,7$	1,55
$1,7 \leq L \leq 2,0$	1,85
$2,0 \leq L \leq 2,3$	2,15
$L > 2,3$	2,40 ou maior

Fonte: Adaptado (AASTHO, 2010)

Tabela 8- Largura do canteiro central

Largura do canteiro central (m)	Arredondamento (m)
$L \leq 4,6$	3,0
$4,6 \leq L \leq 7,6$	6,1
$7,6 \leq L \leq 10,7$	9,2
$10,7 \leq L \leq 13,7$	12,2
$13,7 \leq L \leq 16,8$	15,3
$16,9 \leq L \leq 19,8$	18,3
$19,8 \leq L \leq 22,9$	21,4

22,9 ≤ L ≤ 25,9	24,4
25,9 ≤ L < 29,0	27,5
L > 29,0	30,5

Fonte: Adaptado (AASHTO, 2010)

### 3.5.5. Função de Desempenho de Segurança (SPF's)

A Função de Desempenho de Segurança (SPF's) foi desenvolvida por meio de técnicas estatísticas de regressão múltipla, sendo a frequência de acidentes a variável dependente, e como variáveis independentes: o VDMA e a extensão de cada segmento homogêneo. A SPF é calculada conforme a Equação 9 (AASHTO,2010, adaptada).

Equação 9 - número previsto de acidentes sob condição 'base' por ano em cada trecho

$$N_{spf\ rd} = e^{(a+b \cdot \ln(VDMA) + \ln(\frac{L}{1,6093}))} \quad (9)$$

Onde:

$N_{spf\ rd}$  = número previsto de acidentes sob condição 'base' por ano em cada trecho;

VDMA = volume diário médio anual (veículos/dia) nos trechos;

L = comprimento do trecho em quilômetros;

a, b = coeficientes da regressão (conforme apresentado na Tabela 9 a seguir)

A superdispersão, que está relacionada à variabilidade entre as unidades observadas, é prevista pelo parâmetro de superdispersão (k), associado ao modelo SPF para rodovias de pista dupla é dado pela Equação 10. Quanto mais próximo o parâmetro de superdispersão estiver de zero, mais confiável estatisticamente o SPF.

Equação 10 - cálculo do parâmetro de superdispersão

$$k = \frac{1}{e^{(c+\ln(C))}} \quad (10)$$

Em que:

k = parâmetro de superdispersão associada ao trecho da via;

$c$  = coeficiente da regressão usado para determinar o parâmetro de superdispersão (vide Tabela 9).

Tabela 9- Coeficientes de regressão para equações de trechos homogêneos em rodovias de pista dupla

Nível de severidade acidente		a	b	c
RPD sem divisão central ( $ru$ )	Acidentes Totais (KABCO)	-9,653	1,176	1,675
	Acidentes com vítima (KABC)	-9,41	1,094	1,796
	Acidentes com vítima (KAB)	-8,577	0,938	2,003
RPD com divisão central ( $rd$ )	Acidentes Totais (KABCO)	-9,025	1,049	1,549
	Acidentes com vítima (KABC)	-8,837	0,958	1,687
	Acidentes com vítima (KAB)	-8,505	0,874	1,740

Fonte: Adaptado (AASTHO, 2010)

### 3.5.6 Aplicação dos fatores de calibração (CMF's)

Os ajustes para as condições locais específicas são calculados pelos fatores de modificação  $CMF$  que levam em consideração a diferença entre as condições do local e as condições básicas específicas que foram desenvolvidas. Esses fatores são multiplicados com a frequência de acidentes prevista pelo  $SPF$ . Diante disso, o efeito do  $VDMA$  na frequência de acidentes é incorporado por meio do  $SPF$ , enquanto os efeitos das condições de geometria e recursos de controle de tráfego são incorporados por meio dos  $CMF$ s. Além disso, a AASTHO (2010) recomenda que em rodovias duplicadas, segregadas por um canteiro central, dispendo de alinhamentos independentes e distintos, a metodologia deva ser aplicada duas vezes, isto é, para cada sentido de tráfego isoladamente. Entretanto, utiliza-se o valor do  $VDMA$  combinado e, em seguida, calcula-se a frequência média de acidentes previstos no modelo. Quando a condição do segmento for superior à condição de base do  $SPF$ , o  $CMF$  terá valor maior que 1,0, caso contrário, o valor do  $CMF$  será inferior a 1,0 se a condição de estudo for mais severa que a condição de base (a favor da segurança viária), conforme apresentado na Tabela 10 adiante.

O número de acidentes previstos no modelo é apresentado na Equação 11

$$\text{Equação 11 - número previsto de acidentes} \\ N_{previsto} = N_{SPFX} \cdot C_x \cdot (CMF_{1x} \cdot CMF_{2x} \cdot \dots \cdot CMF_{YX}) \quad (11)$$

Onde:

$N_{previsto}$  : número previsto de acidentes para um determinado ano e local do tipo x;

$N_{SPFX}$  : número previsto de acidentes para condição ideal considerada no desenvolvimento de *SPF* para o local do tipo x;

$C_x$  : fator de calibração regional.

$CMF_{YX}$  : fator de modificação da *SPF* para um local tipo x.

Tabela 10 - Condições 'base' da *SPF* para trechos de rodovias rurais de pista dupla

Pista dupla sem divisão central (ru)		Pista dupla com divisão central (rd)	
Largura da faixa de rolamento	3,65 m	Largura da faixa de rolamento	3,65 m
Largura e tipo de acostamento	1,82 m e pavimentado	Largura e tipo de acostamento	2,44 m
Inclinação do talude lateral	1v:7h ou mais plano	Largura do canteiro central	9,14 m
Iluminação	inexistente	Iluminação	inexistente
Dispositivo automatizado de controle de velocidade	inexistente	Dispositivo automatizado de controle de velocidade	inexistente

Fonte: Adaptado (AASTHO, 2010)

Por fim, se a condição de estudo não distinguir da condição básica do *SPF*, o fator de modificação é igual a 1,0. Para os segmentos em rodovias rurais duplicadas e divididas, a AASTHO (2010) considera cinco fatores de modificação que serão apresentados a seguir.

### CMF1rd - Largura da faixa de rolamento

O fator de modificação que leva em consideração a diferença da faixa de rolamento ( $CMF_{1rd}$ ) na frequência média de acidentes, é calculado pela seguinte Equação 12.

Equação 12 - fator de modificação do efeito da faixa de rolamento

$$CMF_{1rd} = (CMF_{ra} - 1,0) \times p_{ra} + 1,0 \quad (12)$$

Onde:

$CMF_{1rd}$  = fator de modificação do efeito da faixa de rolamento para o total de acidentes;

$CMF_{ra}$  = fator de modificação de acidentes para acidentes relacionados à largura da faixa (saída de pista, colisão frontal e colisão lateral);

$p_{ra}$  = percentual do total de acidentes constituída pelos acidentes relacionados. Adota-se 0,5 para rodovias de pista dupla e segregada.

### CMF2rd - Largura do acostamento à direita

O CMF para largura do acostamento à direita é apresentado na Tabela 11. A condição de base do SPF utiliza como referência a largura de 2,44 m. Caso os valores das larguras de acostamento das condições de estudo forem superiores a 2,44 m ou desconhecidos, recomenda-se utilizar CMF2rd igual a 1,0.

Tabela 11 - CMF conforme a largura média de acostamento

Largura média do acostamento (m)	0	0,61	1,22	1,83	2,44 ou mais
CMF2rd	1,18	1,13	1,09	1,04	1,0

Fonte: Adaptado (AASHTO, 2010)

### CMF3rd - Largura da divisão central

O CMF para larguras médias em segmentos rodoviários divididos por um canteiro central é apresentado na Tabela 12. O acostamento interno e as faixas de conversão estão incluídos nessa largura. A condição básica para este CMF é uma largura média de 9,14 m. O modelo não leva em conta o efeito das barreiras entre as pistas na segurança viária, estabelecendo valor CMF3rd igual a 1,00 para essa condição básica.

Tabela 12 - CMF conforme a largura média da divisão central

Largura da divisão (m)	3,05	6,1	9,14	12,19	15,24	18,29	21,34	24,38	27,43	30,48
CMF3rd	1,04	1,02	1,00	0,99	1,00	0,96	0,96	0,95	0,94	0,94

Fonte: Adaptado de AASHTO (2010)

### CMF4rd - Presença de iluminação

A condição básica do SPF para iluminação é a ausência da mesma, com valor do  $CMF4rd$  igual a 1,0. Para segmentos de estradas iluminadas, utiliza-se a expressão apresentada na Equação 13, a seguir.

Equação 13 - fator de modificação de acidentes para o efeito da iluminação no número total de acidentes

$$CMF4rd = 1 - [(1 - 0,72 \cdot p_{inr} - 0,83 \cdot p_{pnr}) \cdot p_{nr}] \quad (13)$$

Em que:

$CMF4rd$  = fator de modificação de acidentes para o efeito da iluminação no número total de acidentes;

$p_{inr}$  = proporção do número total de acidentes noturnos envolva lesão, fatal ou não (com vítima) em segmentos não iluminados;

$p_{pnr}$  = proporção do número total de acidentes noturnos sem vítimas em segmentos não iluminados;

$p_{nr}$  = proporção do total de acidentes noturnos em segmentos não iluminados.

#### CMF5rd - Presença de radares

A condição básica de aplicação da condição base do modelo (SPF) é que não tenha presença de dispositivos automatizados de controle de velocidade, em que o  $CMF5rd$  é igual a 1,0. Entretanto, o manual indica valor de  $CMF5rd$  igual a 0,94 nos trechos em que há na presença de radares.

#### 3.5.6.1 Fator de Calibração Regional ( $C_x$ )

O manual do HSM indica a utilização do fator de calibração do modelo devido a variabilidade da ocorrência de acidentes por diferenças ambientais, comportamento dos usuários, condições geográficas e por outras razões. O fator de calibração regional é utilizado para condições geográficas regionais que influenciam significativamente na frequência de acidentes observada, uma vez que, o modelo utilizado no HSM foi desenvolvido em condições viárias específicas dos Estados Unidos. Desse modo, esse fator é de fundamental importância na aplicação do HSM em outros países.



Inicialmente, o fator de calibração é igual a 1,0 quando o método se aplica na mesma condição original, podendo ser diferente após calibração. Posteriormente, recalcula-se o valor de  $C_x$  através da Equação 14:

Equação 14 - Fator de Calibração ( $C_x$ )

$$C_x = \frac{\sum N_{observado}}{\sum N_{previsto}} \quad (14)$$

Sendo:

$N_{observado}$  = número de acidentes observado para o período de análise;

$N_{previsto}$  = número de acidentes previsto para o período de análise.

Se o valor de  $C_x$  for muito distante de 1,0 é perceptível a diferença entre o número de acidentes previstos e os observados, além de observar o quão as características da rodovia calibrada e utilizada no estudo diverge das rodovias empregadas no modelo HSM.

### 3.5.7 Método Empírico de Bayes (EB)

A partir da disponibilidade dos dados históricos de acidentes em um determinado local, pode-se aplicar o Método Empírico de Bayes, obtendo como resultado o número esperado de acidentes ( $N_{esperado}$ ).

Esse método foi escolhido por aumentar a precisão de estimativa e correção para a regressão a média. Nesse cálculo, utiliza-se o parâmetro de superdispersão ( $k$ ), obtido em cada equação de regressão das diferentes SPF's. Assim, quanto menor for o valor de  $k$ , maior será a confiabilidade do modelo. Em aplicações de segurança rodoviária, a informação prévia é obtida de um grupo de trechos semelhantes e as informações observadas são a frequência de acidentes para um determinado local de estudo. Nesse sentido, uma estimativa melhorada da frequência de acidentes em longo prazo pode ser obtida pela combinação do número de acidentes previsto pelo modelo com o número de acidentes registrados nos locais de estudo. Métodos EB têm sido amplamente

utilizados e discutidos em estudos de segurança no trânsito nas últimas décadas, especialmente em avaliações de estudos “antes e depois”. No entanto, esse método tem algumas limitações, uma vez que depende da inferência em relação a um grupo de referência que deve ser semelhante ao grupo de tratamento nas características de base (Wood e Donnell, 2017; Lord e Kuo, 2012).

A expressão utilizada para combinação do número de acidentes previsto ( $N_{previsto}$ ) e o número de acidentes observado ( $N_{observado}$ ) é apresentada na Equação 15 (Hauer *et al.*, 2002).

Equação 15 - cálculo do número esperado de acidentes

$$N_{esperado} = w \cdot N_{previsto} + (1 - w) \cdot N_{observado} \quad (15)$$

Onde:

$N_{esperado}$  = número de acidentes esperado para o período de análise;

$N_{previsto}$  = número de acidentes previsto para o período de análise;

$N_{observado}$  = número de acidentes observado para o período de análise.

Sendo o fator de ponderação referente a SPF ( $w$ ), expresso pela Equação 16, a seguir:

Equação 16 - Cálculo do Fator de ponderação

$$w = \frac{1}{1 + k \cdot \sum N_{previsto}} \quad (16)$$

Sendo:

$w$  = fator de ponderação referente a SPF;

$k$  = parâmetro de superdispersão referente a SPF.

### 3.5.8 Análise da Efetividade de uma intervenção: Estudos “Antes e Depois”

As análises da efetividade de um tratamento têm um papel fundamental na redução dos acidentes de trânsito, uma vez que, cada um dos aspectos de avaliação pode contribuir na tomada de decisão de gestores públicos ou privados. O manual do HSM apresenta seis etapas do processo de gestão da Segurança Viária conforme a Figura 23.

Figura 23 - Etapas do processo de gestão para Segurança Viária



Adaptado de AASTHO (2010)

Conforme a Figura 23 a gestão de Segurança Viária é avaliada em formato cíclico que permite a interação com o sistema viário: inicialmente, obtém-se a rede de transportes para identificação dos locais que serão analisados. Por meio do diagnóstico da rede viária, selecionam-se as medidas de tratamento que serão implementadas. Após a identificação do problema e da escolha do tipo de tratamento, é feita uma análise de viabilidade econômica e financeira para priorização das ações das medidas de segurança. Por fim, avalia-se a efetividade após o tratamento adotado. Caso o tratamento seja considerado efetivo, o mesmo poderá ser replicado em outros locais ou até mesmo

aperfeiçoado, facilitando assim, o processo de priorização e alocação de recursos para Segurança Viária.

O capítulo nove do HSM apresenta alguns métodos utilizados para avaliação da eficácia da Segurança Viária, fornecendo os procedimentos necessários para quantificar a efetividade de um determinado tratamento. Os estudos “antes e depois” são utilizados para avaliar a frequência ou o grau de severidade dos acidentes após o tratamento ser aplicado em um determinado local (Hauer, 2002). Para identificar o efeito do tratamento, mede-se o número de acidentes no período “antes” e em seguida no período “depois”. Esse procedimento é mais complexo do que simplesmente comparar dados de acidentes antes e após intervenção, uma vez que, é necessário investigar se a causa da redução dos acidentes foi de fato atribuída ao tratamento utilizado.

O estudo observacional “antes-depois” como próprio nome já diz, busca observar as consequências da intervenção adotada. Segundo Hauer (2002), os estudos observacionais sofreram uma série de críticas, devido a possibilidade de adquirir conclusões menos precisas, para tanto se recomendam estudos experimentais. Conforme a AASTHO (2010), nos estudos experimentais a seleção dos pontos de intervenção é feita em caráter aleatório, enquanto os estudos observacionais levam em consideração o processo de gestão da segurança viária. Nesse sentido, as pesquisas têm um papel imprescindível no direcionamento do tratamento nesse processo de gestão, uma vez que, dificilmente as agências irão investir em intervenções, sem que haja razões específicas para isso.

A união do método antes-depois e o Empírico de Bayes, surgiu como forma de solucionar o fenômeno de regressão à média e realizar estimativas mais precisas.

O método EB aplicado na avaliação da eficácia de um tratamento, foi aprofundado por meios dos estudos realizados por Hauer (2002) e tem sido amplamente utilizado em avaliações para Segurança Viária. A implementação do método EB será detalhada na próxima seção.

#### **3.5.8.1 Implementação do Método EB nos estudos antes-depois**

Conforme abordado nas seções anteriores, para verificar se um determinado tipo de tratamento trouxe melhorias para Segurança Viária, é preciso estimar o

número acidentes ocorridos no período “depois”, caso o tratamento não tivesse sido implementado, e conseqüentemente, comparar essa estimativa com o número de acidentes contabilizados no período “depois”, com o tratamento aplicado. De maneira sucinta o método de avaliação de Segurança Viária antes-depois com a aplicação do Método EB é utilizado para comparar a frequência de acidentes de um grupo de tratamento antes e depois da intervenção. Uma das principais vantagens do método EB é a possibilidade de que sejam utilizadas as SPF's existentes. O método combina a frequência média observada e prevista dos acidentes, com base na SPF, a fim de estimar a frequência média esperada dos acidentes durante o período “depois”.

Desse modo, os métodos bayesianos abordam explicitamente o problema da regressão média ao incorporar os dados de histórico de acidentes em outros grupos semelhantes. Durante a avaliação dos locais que receberam o tratamento, há um alto risco em superestimar o efeito da intervenção no desempenho da Segurança Viária. Assim, a aplicação do EB pode compensar o viés de regressão à média, a partir da exclusão desse efeito (Framarim, 2003). A comparação entre as frequências de acidentes: “observada” e “esperada” do período “depois”, com a frequência média dos acidentes “estimada” no método EB, é a base da avaliação da eficiência da intervenção de Segurança Viária implementada.

Recomenda-se que seja definido o tipo de intervenção que será observada levando-se em consideração o histórico de acidentes e a quantidade de acidentes por nível de severidade. Os requisitos necessários para a análise do número de acidentes são: quantidade mínima de trechos entre 10 e 20, em um período de análise de dados de acidentes de 3 a 5 anos antes da intervenção e 3 a 5 anos depois da intervenção, e que exista um SPF desenvolvido para o tipo de elemento em análise. As etapas de cálculo são apresentadas nas equações a seguir:

Por meio da Equação 17, calcula-se o fator de ajuste para verificar a diferença do número de acidentes previsto entre os períodos “antes” e “depois”:

Equação 17 - Cálculo do fator de ajuste

$$r_i = \frac{\sum N \text{ previsto, A}}{\sum N \text{ previsto, B}} \quad (17)$$

Onde:

$r_i$  = fator de ajuste;

$N_{previsto,A}$  = número de acidentes previsto no período “depois”;

$N_{previsto,B}$  = número de acidentes previsto no período “antes”.

O número esperado de acidentes para o período “depois” é calculado conforme a Equação 18, a seguir:

Equação 18 - número de acidentes esperado (período "depois")

$$N_{esperado,A} = N_{esperado,B} \times r_i \quad (18)$$

Sendo:

$N_{esperado,A}$  = número de acidentes esperado no período “depois”.

$N_{esperado,B}$  = número de acidentes esperado no período “antes”.

O cálculo da estimativa da eficácia da segurança em cada segmento em termos de número observado de acidentes e número esperado de acidentes é obtida pela Equação 19:

Equação 19 - estimativa da eficácia da segurança por segmento

$$OR_i = \frac{\sum N_{observado,A}}{\sum N_{esperado,A}} \quad (19)$$

Onde:

$OR_i$  = estimativa da eficácia da segurança por segmento;

$N_{observado,A}$  = número de acidentes observado no período “depois”.

$N_{esperado,A}$  = número de acidentes esperado no período “depois”.

Cálculo da eficácia da segurança em cada segmento em percentual é realizado pela Equação 20.

Equação 20 - Eficácia da segurança por segmento (%)

$$Eficácia da segurança_i = 100 \times (1 - OR_i) \quad (20)$$

Posteriormente, calcula-se a efetividade da segurança em todos os segmentos, pela Equação 21:

Equação 21 - Efetividade da segurança em todos os segmentos

$$OR' = \frac{\sum_{(todos\ os\ trechos)} N\ observado, A}{\sum_{(todos\ os\ trechos)} N\ esperado, B} \quad (21)$$

Na etapa seguinte, calcula-se a estimativa da efetividade não viesada do tratamento adotado (Equação 22).

Equação 22 - Estimativa da efetividade (não viesada)

$$OR = \frac{OR'}{1 + \frac{var(\sum_{(i)} N\ esperado, A)}{\sum_{(i)} N\ esperado, A}} \quad (22)$$

Sendo:

$$var(\sum_{(i)} N\ esperado, A) = (\sum_{(i)} [(ri)^2 \times N\ esperado, B \times (1 - wi, B)]).$$

A efetividade geral do tratamento (não viesada) em percentual é obtida pela Equação 23, a seguir:

Equação 23 - Efetividade geral do tratamento (não viesada) em %

$$Eficácia\ da\ segurança_{geral} = 100 \times (1 - OR) \quad (23)$$

Na etapa seguinte do método antes e depois, calcula-se a variância da razão de desigualdade da efetividade do tratamento pela Equação 24.

Equação 24 - variância da razão de desigualdade da efetividade do tratamento

$$var(OR) = \frac{(OR')^2 \left[ \frac{1}{N_{obs,depois}} + \frac{var(\sum_i N_{esp,depois})}{(\sum_i N_{esp,depois})^2} \right]}{\left[ 1 + \frac{var(\sum_{(i)} N_{esp,depois})}{(\sum_i N_{esp,depois})^2} \right]} \quad (24)$$

O desvio padrão da razão de desigualdade calculada na equação anterior, é calculado conforme apresentado na Equação 25:

Equação 25 - Cálculo do desvio padrão da razão de desigualdade

$$DP(OR) = \sqrt{VAR(OR)} \quad (25)$$

Cálculo do desvio padrão da efetividade do tratamento não viesada, é obtido pela Equação 26.

Equação 26 - Cálculo do desvio padrão da efetividade do tratamento não viesada

$$DP(SE) = 100 \cdot DP(OR) \quad (26)$$

No final do método obtém-se a significância estatística da efetividade da segurança estimada através da Equação 27 a seguir:

Equação 27 - Avaliação da segurança

$$NS = \frac{SE}{DP(SE)} \quad (27)$$

A avaliação da segurança calculada na, é avaliada da seguinte maneira:

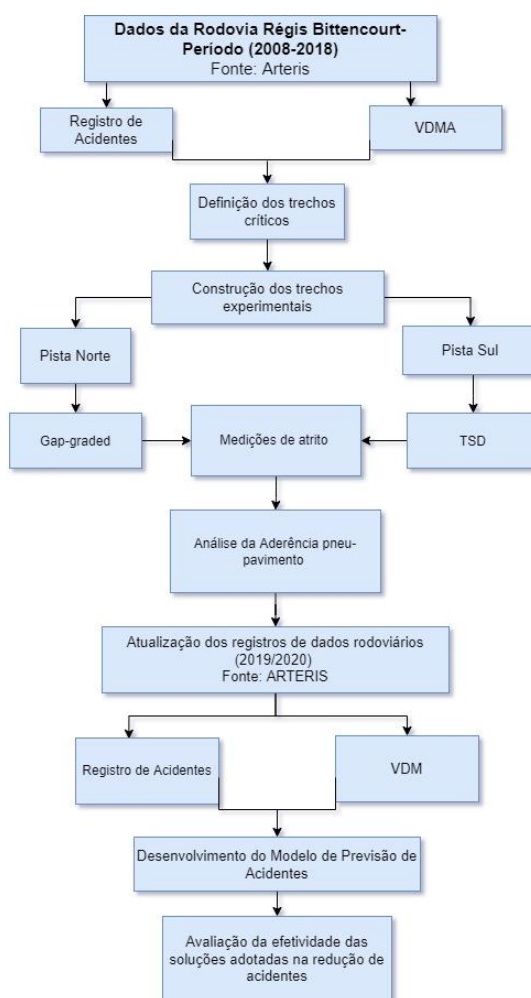
- Se  $NS < 1,7$  o efeito do tratamento não é significativo em um intervalo de confiança de 90%;
- Se  $NS \geq 1,7$  o efeito do tratamento é significativo em um intervalo de confiança de 90%;
- Se  $NS \geq 2,0$  o efeito do tratamento é significativo em um intervalo de confiança de 95%.



## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Para analisar a aderência pneu-pavimento e a sua relação com a ocorrência de acidentes ao longo do tempo, neste estudo foram realizados ensaios de campo para levantamento do atrito e textura do pavimento em quatro trechos localizados na Rodovia Régis Bittencourt (dois trechos no sentidos norte e dois trechos no sentido sul). Neste capítulo, serão abordadas as etapas metodológicas definidas com o propósito de atingir os objetivos deste trabalho. A Figura 24 apresenta o fluxograma das etapas propostas nesta pesquisa.

Figura 24 - Fluxograma da metodologia utilizada na presente pesquisa.



Fonte: A autora (2022)

Ressalta-se que com a aquisição do *grip-tester* pelo Laboratório de Tecnologia em Pavimentação da Universidade de São Paulo (LTP/USP), foi incluído ao

escopo deste trabalho o processo de calibração, montagem e operação deste equipamento.

#### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DA RODOVIA EM ESTUDO

A pesquisa compreende cinco quilômetros de extensão da rodovia Régis Bittencourt (BR 116). Destes cinco quilômetros foram selecionados dois trechos no sentido norte e dois trechos no sentido sul.

A rodovia Régis Bittencourt abrange um total de 402,6 km de extensão, sendo considerada a mais importante ligação rodoviária entre os principais polos econômicos entre o Sudeste e o Sul do Brasil. A rodovia em estudo, interliga as cidades de São Paulo e Curitiba, englobando 17 municípios dos Estados de São Paulo e Paraná (Figura 25). As pistas norte (sentido São Paulo) e sul (sentido Curitiba) são segregadas em toda sua extensão. Conforme o Relatório de Acidentes Rodoviários da Confederação Nacional de Transportes (CNT, 2019), a rodovia se enquadra em um dos trechos mais perigosos quanto à ocorrência de acidentes de trânsito com vítimas no Brasil. O LTP/USP atua no desenvolvimento de projetos de pesquisa com Recurso de Desenvolvimento Tecnológico (RDT) conjuntamente com a Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT) e a Concessionária Autopista Régis Bittencourt, que detém a concessão da via desde o ano de 2008, no intuito de reduzir o número de mortes em acidentes rodoviários, buscando alcançar melhorias para Segurança Viária.

Figura 25 - Localização da Rodovia Régis Bittencourt



Fonte: A autora (2022)

## 4.2 ESTUDO DE CASO

Conforme o Relatório Final de Soluções para Redução de Acidentes (2019), o desenvolvimento do estudo iniciou em 2015, previamente a esta pesquisa. Durante as primeiras etapas, os registros de acidentes foram avaliados por meio de análises espaciais e estatísticas. Além disso, os acidentes foram caracterizados em diferentes atributos, tais como: localização, data e hora da ocorrência; tipo de ocorrência; grau de severidade; condições meteorológicas; condições de visibilidade; condições associadas às características de relevo e traçado. Como resultado dessas análises, foram identificados os segmentos de via mais críticos, e dentre eles os trechos experimentais foram selecionados (baseando-se também em critérios técnicos-construtivos) e receberam as intervenções de melhoria para Segurança Viária. Maiores detalhes sobre essas etapas, para o sentido norte da rodovia, podem ser encontrados em Machado *et al.* (2021).

No ano de 2016, foram executados dois trechos experimentais na pista norte (trechos experimentais 1 e 2) com aplicação de *gap-graded*, objeto de estudo de Carvalho (2019). De forma similar às análises realizadas para o trecho norte da rodovia, foram definidos os trechos críticos de acidentes para a pista sul (trechos experimentais 1 e 2) que foram construídos no ano de 2017 com aplicação de Tratamento Superficial Duplo (TSD), objeto de estudo de Linhares (2021).

Na presente pesquisa, os dados foram atualizados, com a introdução dos dados operacionais e de registros de acidentes referentes até o ano de 2020, como também dos resultados das medições de campo quanto ao atrito e textura em ambos os sentidos da rodovia. A finalidade desta reavaliação se refere ao monitoramento e à verificação do desempenho das soluções asfálticas adotadas, atuando na redução da ocorrência de acidentes.

Ressalta-se que o presente estudo utiliza, em sua concepção, três pesquisas realizadas com objetivo de reduzir o índice de acidentes na rodovia Régis Bittencourt. O modelo de previsão de acidentes desenvolvido nesta pesquisa complementa as informações geradas do modelo proposto por Carvalho (2019) do sentido norte da rodovia, por meio da análise da efetividade do tratamento do período após três anos de implantação. Além disso, é pertinente mencionar o estudo realizado por Linhares (2019), que avaliou o Tratamento Superficial Duplo com Asfalto Modificado por Borracha na redução de acidentes no sentido sul da rodovia.

Para contribuição das análises de aderência pneu-pavimento, no ano de 2021 foram realizadas novas medições de atrito para o tratamento com TSD no sentido sul da rodovia. A continuidade das investigações de atrito para o sentido norte da rodovia, foi interrompida para este mesmo período devido a descaracterização do trecho em estudo por parte da concessionária que por meio das inspeções de manutenção e conservação da rodovia, identificou que o *gap-graded* utilizado estava bastante desgastado.

### 4.3 PROCEDIMENTO DE MEDIÇÃO DE ATRITO: EQUIPAMENTO *GRIP-TESTER*

Precedendo as ações de monitoramento nos trechos experimentais da rodovia Régis Bittencourt, e com o intuito de entender o funcionamento do equipamento *grip-Tester*, realizou-se dentro do Campus da Universidade de São Paulo (Butantã – São Paulo – SP), entre os meses de setembro e outubro de 2020, procedimentos de calibração, operação e manuseio, a fim de assegurar um bom desempenho durante as aferições em campo na rodovia e no processamento dos dados (Figura 26).

Ressalta-se que o *grip-tester* utilizado nesta pesquisa é comercializado e desenvolvido pela mesma empresa, a *Cibermétrica Equipamentos e Serviços Ltda*, que forneceu o treinamento inicial antes da realização das medições em campo. Os dados foram processados, calculados e armazenados automaticamente através do software *Roadbase*, que é transportado dentro da cabine do veículo e manuseado por um operador durante a aferição das leituras dinâmicas de atrito.

As leituras dinâmicas de atrito dentro do campus da USP, foram realizadas na velocidade de 20 km/h, obedecendo os limites para baixas velocidades de operação de tráfego dentro da Universidade. A espessura da lâmina d'água deste equipamento é de 0,25 mm. Caso o software do equipamento indicasse algum problema durante o levantamento (leitura indevida, velocidade com limite inferior delimitado pelo equipamento, falhas no acionamento da lâmina d'água, etc.), a medição era refeita imediatamente.

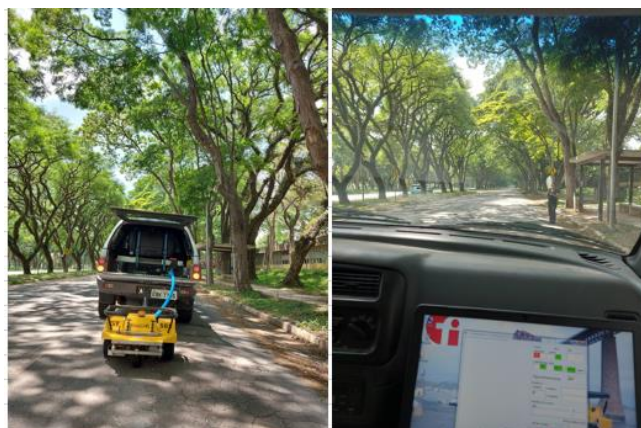
Salienta-se que na rodovia as medições foram realizadas na velocidade de 50 km/h, com intervalo de cinco metros entre cada medição. A Figura 27 apresenta as medições realizadas no campus da USP nos meses de setembro e outubro de 2020 e a Figura 28 apresenta o monitoramento dos trechos experimentais das pistas norte e sul, realizados em novembro de 2020 e outubro de 2021.

Figura 26 - Processo de calibração do *grip-tester*



Fonte: A autora (2022)

Figura 27 - Leitura dinâmica de atrito com equipamento *grip-tester* realizadas no Campus da USP (Butantã – São Paulo - SP)



Fonte: A autora (2022)

Figura 28 – Montagem do equipamento *grip-tester* e monitoramento dos trechos experimentais na Rodovia Régis Bittencourt



Fonte: A autora (2022)

#### 4.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA DE ACIDENTES

De acordo com os dados fornecidos pela concessionária “Autopista Régis Bittencourt”, na fase inicial do projeto foram utilizados os dados de registros de acidentes durante o período de 2008 até 2018.

##### 4.4.1 Volume Diário Médio Anual

Conforme apresentado na Tabela 13, os dados do Volume Diário Médio Anual (VDMA) que passa pelas praças de pedágios da rodovia nos sentidos norte e sul foram divididos em nove segmentos homogêneos (SH). No cálculo do VDMA consta a quantidade de veículos que passa a cada dia e a cada hora pelas praças de pedágio.

Tabela 13 - Segmentos homogêneos e praças de pedágio – Rodovia Régis Bittencourt

Segmentos Homogêneos (SH) (Pistas Norte e Sul)	km	Localização das Praça de Pedágio (km)	Localidade
SH1	269 - 278	-	-
SH2	278 - 288	-	-
SH3	288 - 336	P1 = 298,7 (SP)	São Lourenço da Serra
SH4	336 - 371	P2 = 370,7 (SP)	Miracatu
SH5	371 - 444	P3 = 426,8 (SP)	Juquiá
SH6	444 - 498	P4 = 485,75 (SP)	Cajati
SH7	498 - 569	P5 = 543,9 (SP)	Barra do Turvo
SH8	0 - 71	P6 = 56,95 (PR)	Campina Grande do Sul
SH9	71 - 90	-	-

Fonte: Adaptado de Relatório Final – Régis Bittencourt (2019)

#### 4.4.2 Taxas de acidentes

As taxas de acidentes são comumente expressas em acidentes por milhões de veículos x km em um determinado trecho da via, obtida pela Equação 28 (BRASIL, 2002).

Equação 28 - Taxa de acidentes

$$T = \frac{n^{\circ} (\text{acidentes}) \cdot 10^6}{P \cdot V \cdot E} \quad (28)$$

Onde:

T = Taxa de acidentes por milhões de veículos x km;

P: Período de estudo, em dias (geralmente 365 dias);

V: Volume médio diário que passa pelo trecho;

E: Extensão do trecho (em km).

#### 4.4.3 Análises Espaciais

O diagnóstico apresentado dos acidentes na Rodovia Régis Bittencourt foi utilizado para análise dos trechos críticos de acidentes da via para Segurança Viária. No Relatório final da Autopista Régis Bittencourt (2018), foram realizadas as análises espaciais em ambiente SIG (Sistema de Informações Geográficas) para seleção dos trechos experimentais que receberam as soluções asfálticas,



adotadas para aumentar o atrito e melhorar a aderência pneu-pavimento. O banco de dados espacial foi composto das seguintes informações:

- Localização do acidente (quilômetro e sentidos: norte e sul);
- Data (dia, mês e ano), dia da semana e horário do acidente;
- Tipo de ocorrência (fatal, com vítima ou com dano material);
- Tipo de acidente (colisão, choque, tombamento lateral, capotamento, atropelamento);
- Causa Provável do acidente (excesso de velocidade, perda de controle do veículo/imperícia, derrapagem, chuva.);
- Local da via onde ocorreu o acidente (faixa de rolamento, acostamento, canteiro central);
- Identificação dos veículos envolvidos;
- Número de veículos envolvidos;
- Número de vítimas (leves, moderadas, graves ou fatais), e de ilesos;
- Condição de visibilidade no momento do acidente (boa, regular ou ruim);
- Existência ou não de uma condição especial na pista (buraco, lama, poça d'água, óleo, areia, etc.);
- Condições meteorológicas no momento do acidente;
- Condição da pista (seca ou molhada);
- Traçado da pista (tangente, curva suave ou curva acentuada);
- Perfil da pista (em nível, aclive ou declive).

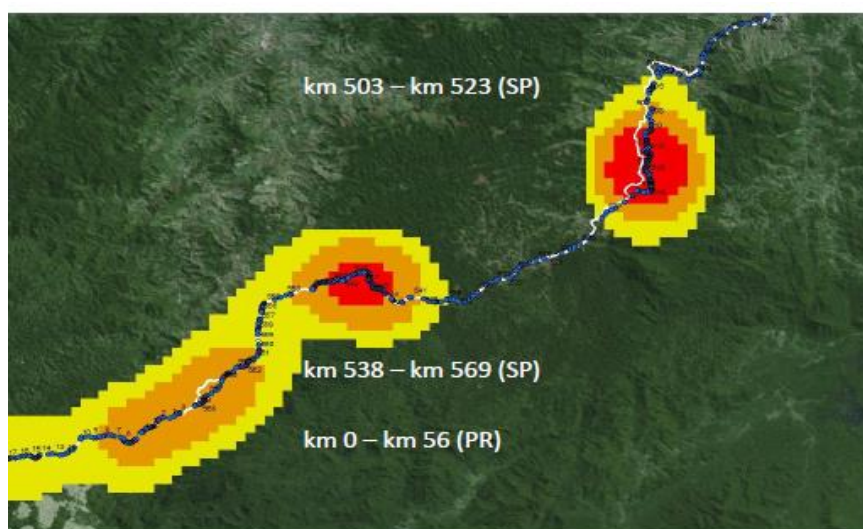
Durante a fase inicial de consolidação da base de dados para determinação dos trechos críticos, foram considerados 6.231 acidentes no sentido norte e 7.626 acidentes no sentido sul da Rodovia Régis Bittencourt, ocorridos no período entre 2008 e 2013.

O estimador de densidade Kernel, aplicado no sistema SIG, é utilizado para gerar uma interpolação sob as bases cartográficas a fim de localizar as concentrações de um determinado evento, em maior ou menor intensidade (MATSUMOTO e FLORES, 2012). Para a obtenção do cálculo de densidade Kernel em rede, foi utilizada a ferramenta SANET que foi disponibilizada e desenvolvida pelo grupo de pesquisa Okabe *et al.*, (2006) da Universidade de Tóquio. Maiores detalhes sobre o estimador de densidade Kernel e da

ferramenta SANET podem ser obtidos em Machado *et al.* (2020) e Machado *et al.* (2021).

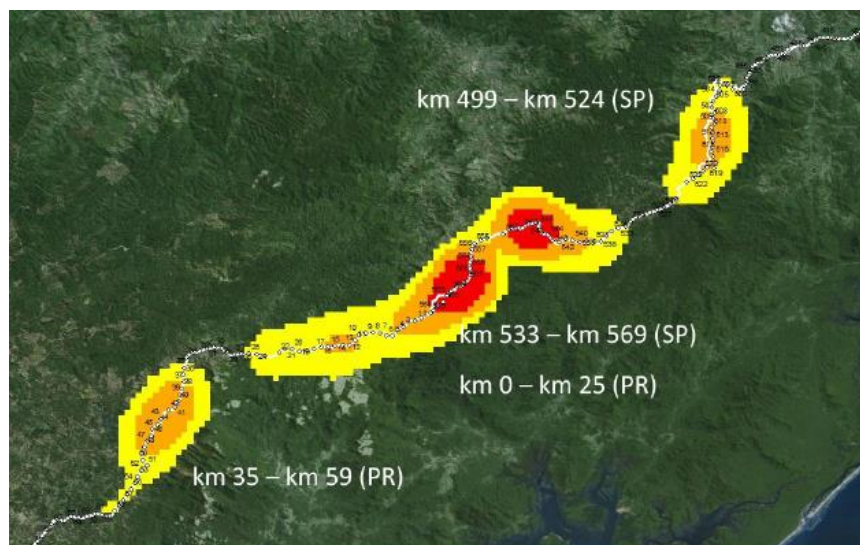
A Figura 29 e Figura 30 evidenciam os trechos mais críticos de acidentes, em km, dos sentidos norte e sul, respectivamente.

Figura 29 - Quilômetros críticos – Acidentes Totais - Rodovia Régis Bittencourt - Pista Norte



Fonte: Relatório Final (2019)

Figura 30 - Quilômetros críticos – Acidentes Totais - Rodovia Régis Bittencourt - Pista Sul.



Fonte: Relatório Final (2019)

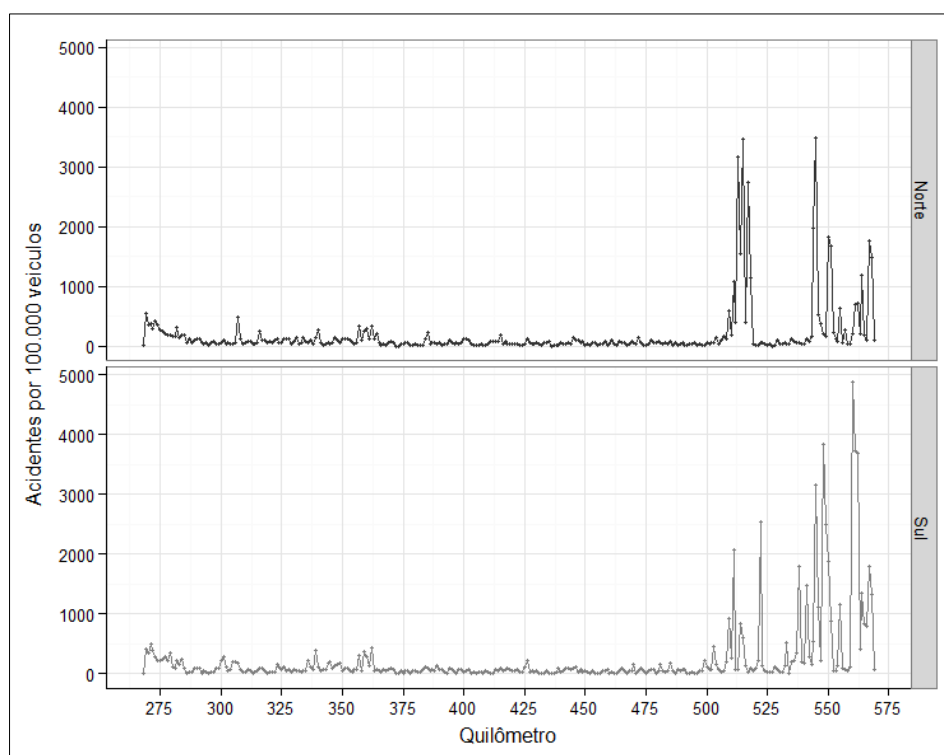
Na segunda fase do estudo para determinação dos trechos mais críticos em relação a ocorrência de acidentes, tomou-se como referência a restituição

das imagens adquiridas do voo sobre a rodovia (aerofotogrametria), realizado em 2008. Os trechos críticos de acidentes estão localizados na Serra do Cafezal e Barra do Turvo. O estudo se concentrou na região da Barra do Turvo (via duplicada), localizado na Serra do Azeite, uma vez que na região da Serra do Cafezal, no início das análises de projeto, estavam sendo executadas as obras de duplicação da rodovia.

#### 4.4.4 Análises Estatísticas Descritivas

A partir da atualização da base de dados entre o período de 2008 a 2015, juntamente com as análises espaciais durante as primeiras fases do estudo, foram realizadas análises estatísticas descritivas a fim de complementar o estudo e identificar qual o perfil padrão dos acidentes ocorridos na rodovia, conforme apresentado no Gráfico 2.

Gráfico 2- Taxa do número de acidentes por 100 mil veículos x localização (km) da Rodovia -2008-2015



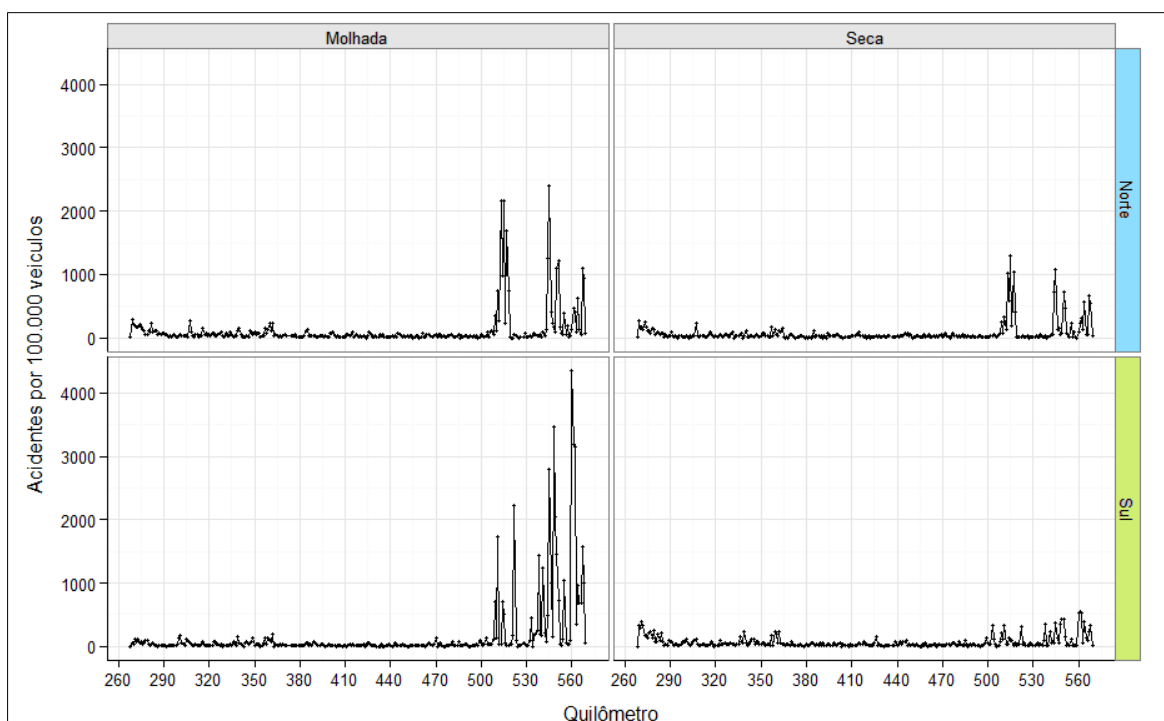
Fonte: Relatório Final (2019)

Observou-se que no sentido norte, os quilômetros: 509; 511; 513; 514; 515; 517; 518; 544; 545; 550; 551; 555; 561; 562; 564; 567; 568 apresentaram

quantidade superior de acidentes quando comparada aos demais trechos totalizando 3.845 acidentes, que corresponde a uma taxa média de 31,19 por km x ano. No sentido sul os quilômetros: 509; 511; 514; 515; 522; 538; 541; 544; 545; 546; 548; 549; 550; 551; 555; 560; 561; 562; 564; 565; 566; 567; 568 apresentaram um total de 5.308 acidentes equivalente a uma taxa média de 31,8 por km x ano.

A influência das condições meteorológicas na via pode ser observada no Gráfico 3.

Gráfico 3 - Taxa de acidentes por 100 mil veículos x condição da pista x localização (km) da Rodovia -2008-2015



Fonte: Relatório Final (2019)

Observou-se que o número de acidentes em condições de pista molhada foi superior em relação ao número de acidentes em condição de pista seca, uma vez que, a quantidade de acidentes em pista molhada totalizou 60,3% no sentido norte e 67,6% no sul. Além disso, nos quilômetros com elevado número de acidentes, estes percentuais foram de 67,5% e 98,4% nos sentidos norte e sul, respectivamente. No fim desta etapa de estudo, os trechos mais críticos foram os compreendidos entre os quilômetros (Tabela 14):

Tabela 14 - Trechos selecionados mais críticos de acidentes

<u>Pista norte:</u>	<u>Pista sul:</u>
<input type="checkbox"/> km 513 – km 514	<input type="checkbox"/> km 545 – km 546
<input type="checkbox"/> km 517 – km 518	<input type="checkbox"/> km 548 – km 549
<input type="checkbox"/> km 545 – km 546	<input type="checkbox"/> km 560 – km 561
<input type="checkbox"/> km 551 – km 552	<input type="checkbox"/> km 562 – km 563

Fonte: Relatório Final (2019)

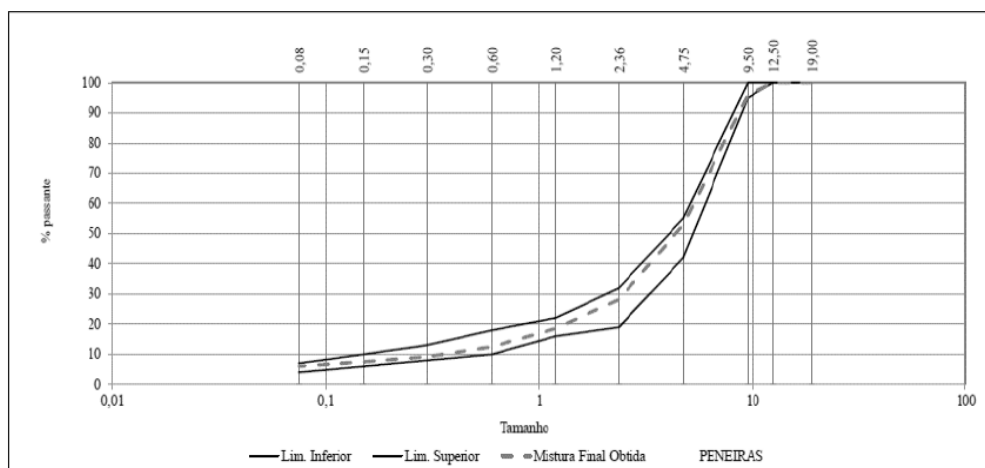
## 4.5 TRECHOS EXPERIMENTAIS

Após a seleção dos trechos mais críticos de acidentes, foi realizada uma visita técnica na rodovia para a análise da viabilidade técnica dos trechos experimentais. Nos meses de junho e julho de 2016, foram feitas as intervenções com solução asfáltica *gap-graded* na pista norte e nos meses de novembro e dezembro de 2017 realizaram-se, na pista sul, as intervenções com TSD. Os trechos localizam-se em regiões de serra, e possuem traçados separados e diferentes para os sentidos norte e sul do tráfego. As estacas dos trechos experimentais 1 e 2 na pista norte da rodovia são numeradas em ordem decrescente em relação ao sentido do tráfego, enquanto na pista sul são numeradas em ordem crescente.

### 4.5.1 Pista Norte

A solução adotada para o sentido norte da rodovia foi o emprego da mistura a quente com granulometria do tipo descontínua (*gap-graded*) com tamanho nominal máximo de 9,5 mm (Figura 31). O ligante asfáltico empregado na mistura foi modificado por polímero elastomérico (estireno-butadieno-estireno) enquadrado segundo a Agência Nacional de Petróleo e o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes como o tipo 60/85-E (Tabela 15). Segundo Carvalho (2019), foi aplicado a mistura *gap-graded* a quente com camada de 40 mm de espessura. A textura final do *gap-graded* após aplicação em campo é apresentada na Figura 32.

Figura 31 - Distribuição granulométrica da mistura empregada no trecho experimental da pista norte



Fonte: Relatório Final (2019)

Tabela 15 - Dosagem da mistura

Parâmetro	Valores
Teor de Ligante (%)	5,5
Massa Específica Aparente (g/cm³)	2,397
Massa Específica Máxima (g/cm³)	2,523
Volume de vazios (%)	5
Vazios do Agregado Mineral (%)	16,1
Vazios Cheios de Asfalto (%)	68,9
Resistência à Tração Indireta a 25°C (Mpa)	2,00
Porcentagem de grãos com Relação > 1:3	14

Fonte: Relatório Final (2019)

Figura 32 - Textura da mistura asfáltica aplicada em campo.



Fonte: Relatório Final (2019)

#### 4.5.1.1 Trecho Experimental Norte 1

O Trecho Experimental Norte 1, apresentado na Figura 33, compreende os km 518 e km 517 + 530, foi liberado ao tráfego em 26/06/2016, com extensão de 470 m. O traçado geométrico é caracterizado por curva à direita com raio de aproximadamente 410 m. A velocidade operacional é de 80 km/h e não há presença de equipamento de radar ou iluminação (CARVALHO, 2019). A execução do Trecho Experimental Norte 1 é apresentada na Figura 34.

Figura 33 - Trecho experimental norte 1



Fonte: A autora (2022)

Figura 34 - Execução do trecho experimental norte 1



Fonte: Relatório Final (2021)

#### 4.5.1.2 Trecho Experimental Norte 2

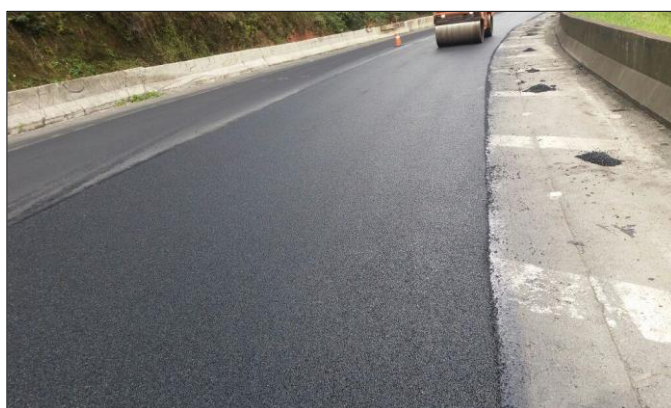
O Trecho Experimental Norte 2, apresentado na Figura 35, compreende os km 545 + 370 a km 544 + 720, com extensão de 650 m. Está localizado entre duas curvas à direita com raio de aproximadamente 300 m e 120 m, intercaladas por um pequeno trecho em tangente. A velocidade operacional é de 60 km/h e assim como no Trecho Experimental Norte 1, não há presença de equipamento de radar ou iluminação (CARVALHO, 2019). A execução do Trecho Experimental Norte 2 é apresentada na Figura 36.

Figura 35 - Trecho experimental norte 2



Fonte: A autora (2022)

Figura 36 - Execução do trecho experimental norte 2



Fonte: Relatório Final (2019)



#### 4.5.2 Pista Sul

Nos trechos experimentais 1 e 2 da pista sul, foi selecionada a solução de Tratamento Superficial Duplo (TSD), com utilização de asfalto modificado por borracha moída de pneus. Para determinação da taxa ideal de aplicação para o espalhamento dos agregados, foi aplicado o método conhecido como caixa dosadora, sendo os agregados espalhados horizontalmente em uma caixa com dimensões de 800 mm x 250 mm x 40 mm. Nas Tabela 16 e Tabela 17, são apresentadas as características do Cimento Asfáltico de Petróleo Modificado por Borracha que foi utilizado durante a execução dos trechos.

Tabela 16 - Análise do CAP Borracha utilizado no trecho experimental sul 1

Ensaio	Norma	Especificação	Resultados
Penetração a 25°C, 100g, 5s, 0,1mm	NBR-6576	30 - 70	46
Ponto Amolecimento, °C	NBR-6560	Mínimo de 57	60
Recuperação Elástica, %	NLT-329/91	Mínimo de 55	70
Ponto de Fulgor, °C	NBR-11341	Mínimo de 235	>240
Densidade Relativa, 25°C, g/cm <sup>3</sup>	NBR-6296	Anotar	1,03
Viscosidade Brookfield a 175°C, SP 3, 20 RPM, cP	NBR- 15529	2200-4000	3750

Fonte: Relatório Final (2019)

Tabela 17 - Análise do CAP Borracha utilizado no trecho experimental sul 2

Ensaio	Norma	Especificação	Resultados
Penetração a 25°C, 100 g, 5 s, 0,1 mm	NBR-6576	30 - 70	47
Ponto Amolecimento, °C	NBR-6560	Mínimo de 57	60
Recuperação Elástica, %	NLT-329/91	Mínimo de 55	70
Ponto de Fulgor, °C	NBR-11341	Mínimo de 235	> 240
Densidade Relativa, 25°C, g/cm <sup>3</sup>	NBR-6296	Anotar	1,02
Viscosidade Brookfield a 175°C, SP 3, 20 RPM, cP	NBR- 15529	2200-4000	3300

Fonte: Relatório Final (2019)

A granulometria do agregado utilizado na mistura com TSD está de acordo com a Norma DEINFRA-SC-ES-P.12/16. A Brita 1 e o Pedrisco foram enquadrados na faixa 5 na primeira, assim como na segunda camada. Na Tabela 18 e Tabela 19 são apresentadas as características básicas dos agregados utilizados e na Tabela 20 a granulometria obtida dos agregados.

Tabela 18 - Propriedades do agregado

Ensaio	Unidade	Especificação	Brita 1	Pedrisco
Densidade Aparente Solta	(g/cm <sup>3</sup> )	-	1,504	1,543
Índice de Lateralidade (DAER/RS-EL 108/01)	(%)	30 - máx.	22,5	14,5
Abrasão "Los Angeles" (NBR 6465)	(%)	40 - máx.	12,9	

Fonte: Relatório Final (2019)

Tabela 19 - Granulometria do agregado

Peneira		Brita 1	Faixa 5 DEINFRA 1ª Camada	Pedrisco	Faixa 5 DEINFRA 2ª Camada
Pol	mm				
1"	25,4	100	100	-	-
3/4"	19,1	97,5	95 - 100	-	-
1/2"	12,5	36,4	20 - 40	-	100
3/8"	9,5	4,7	0 - 10	97,8	95 - 100
1/4"	6,35	-	-	-	-
Nº 4	4,75	0	0 - 5	15,4	0 - 20
Nº 10	2	-	-	0,1	0 - 5
Nº 200	0,075	0	0 - 1	0,1	0 - 1

Fonte: Relatório Final (2019)

A Tabela 20 apresenta as quantidades de materiais que foram utilizadas para execução do Tratamento Superficial Duplo.

Tabela 20 - Taxas de aplicação dos materiais para execução do TSD

Taxa da 1ª aplicação do ECOFLEX TS	0,9 kg/m <sup>2</sup>
Taxa da 1ª aplicação do Agregado- Brita 1	18,3 kg/m <sup>2</sup>
Taxa da 2ª aplicação do ECOFLEX TS	1,0 kg/m <sup>2</sup>
Taxa da 1ª aplicação do Agregado- Pedrisco	11,0 kg/m <sup>2</sup>

Fonte: Relatório Final (2019)

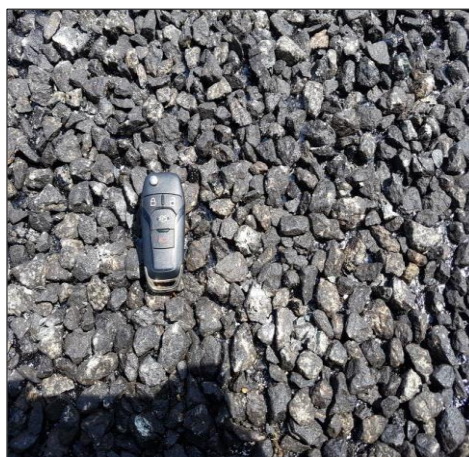
Inicialmente, foi realizado o pré-envolvimento dos agregados com cimento asfáltico de petróleo convencional de classificação 50/70, realizado em usina de concreto asfáltico usinado a quente, com uma taxa de ligante de 0,5% para a Brita 1 e de 0,8% para o pedrisco (Figura 37). A textura da primeira camada do TSD após aplicação em campo é apresentada na Figura 38.

Figura 37 - Pré envolvimento realizado nos agregados (brita 1 e pedrisco, respectivamente).



Fonte: Relatório Final (2019)

Figura 38 - Textura obtida após aplicação da primeira camada



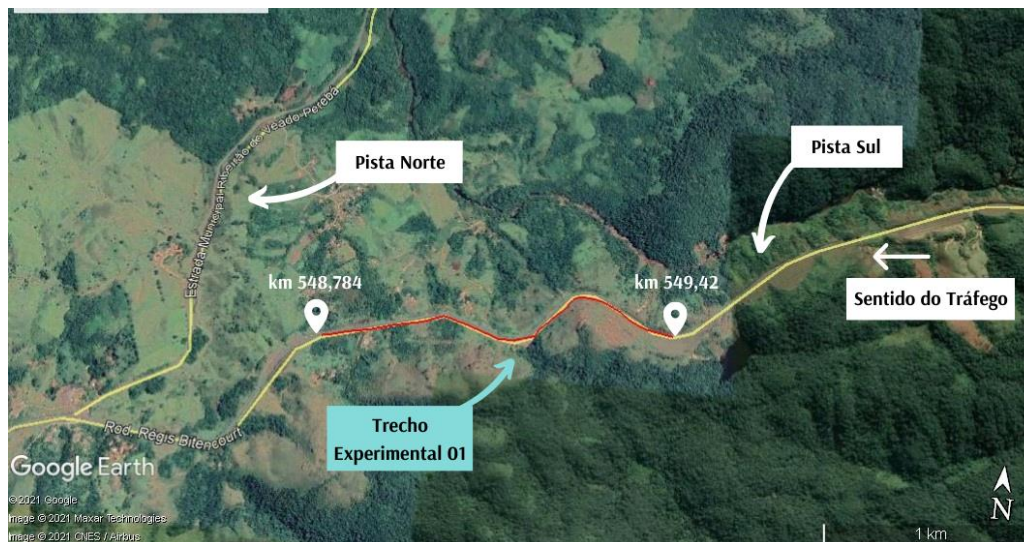
Fonte: Relatório Final (2019)

#### 4.5.2.1 Trecho Experimental Sul 1

O Trecho Experimental Sul 1, apresentado na Figura 39, compreende os km 548 + 784 m ao km 549 + 420, foi liberado ao tráfego em 15/11/2017, com extensão de 636 m. A velocidade operacional é de 80 km/h e não há presença

de equipamento de radar ou iluminação. A execução do Trecho Experimental Sul 1 é apresentada na Figura 40.

Figura 39 - Trecho experimental sul 1



Fonte: A autora (2022)

Figura 40 - Execução do trecho experimental sul 1



Fonte: Relatório Final (2019)

#### 4.5.2.2 Trecho Experimental Sul 2

O Trecho Experimental 2, apresentado na Figura 41, compreende os km 560 ao km 563 + 300, foi liberado ao tráfego em 10/12/2017, com extensão de 3.300 m. A velocidade operacional é de 80 km/h e não há presença de

equipamento de radar ou iluminação. A execução do Trecho Experimental Sul 2 é apresentada na Figura 42.

Figura 41 - Trecho experimental sul 2



Fonte: A autora (2021)

Figura 42 - Execução do trecho experimental sul 2



Fonte: Relatório Final (2019)

#### 4.6 MEDIÇÕES DE CAMPO

Nos anos de 2015, 2016, 2017 e 2018 foram realizados ensaios de campo antes e depois das intervenções para obtenção do *grip number* (GN) e *Mean*

*Profile Depth* (MDP). No sentido norte, durante a data de coleta das primeiras medições, ainda não estavam definidos o posicionamento dos trechos experimentais. Desse modo, o trecho em quilômetros da primeira medição não abrangeu os trechos experimentais que receberam as intervenções e a medição 1 só foi considerada para fins de representação do que era a textura antes da construção dos trechos. Além disso, nos primeiros levantamentos de atrito e textura, os dados referentes ao trecho experimental norte 2 foram aferidos antes do trecho ser refeito e liberado em 11/04/2017, por conta da ocorrência do escorregamento da mistura asfáltica durante o processo construtivo.

No sentido sul, durante medição 1, o posicionamento do trecho experimental sul 2 não havia sido selecionado. Assim, a medição 1 do trecho experimental sul 1 serviu como referência dos valores de atrito e textura antes da intervenção em ambos os trechos. Conforme apresentado na Tabela 21, as medições 1 e 2 ocorreram antes da intervenção e a 3 e 4 após a mesma.

Tabela 21 - Medições de Atrito e Textura

Sentido Norte - Medições de Atrito e Textura				Sentido Sul - Medições de Atrito e Textura			
Medição	Data	Trecho (km)	Intervalo de Aferição (m)	Medição	Data	Trecho (km)	Intervalo de Aferição (m)
1	out/15	555 a 545	20	1	out/15	545 a 555	20
2	dez/16	518 a 512 e 562 a 543	10	2	set/17	545 a 565	10
3	dez/17	520 a 516 e 547 a 543	10	3	dez/17	547 a 551 e 558 a 565	10
4	jun/18	520 a 516 e 547 a 543	10	4	jun/18	547 a 551 e 558 a 565	10

Fonte: Adaptado de Relatório Final (2019)

Após dois anos da última aferição, foram realizadas medições de atrito em 17 de novembro de 2020, que teve como intuito avaliar a ocorrência de alterações das características de superfície do revestimento com a ação do tráfego. Além disso, complementar as análises da efetividade da intervenção dos estudos “antes-depois” no período de três anos após intervenção, recomendado pela AASTHO (2010).

A macrotextura foi avaliada pelo ensaio de mancha de areia (ASTM 1996), realizados pela Concessionária “Autopista Régis Bittencourt”, e a microtextura foi medida por meio do equipamento de roda parcialmente bloqueada, equipamento *grip-tester* pertencente ao LTP/USP. A análise de classificação da

macrotextura foi conduzida conforme proposta por Aps (2006). Após o processamento dos dados atualizados, fez-se a avaliação pelo índice IFI (ASTM E1960).

Para fins de comparação entre os revestimentos asfálticos, foi definido neste estudo que as medições com Grip-Tester fossem realizadas também nos trechos nos quilômetros jusante e montante aos trechos experimentais (norte e sul) revestidos com Concreto Asfáltico (CA), conforme apresentado na Tabela 22 e Tabela 23.

Tabela 22 - Sentido Norte - Medições de atrito com equipamento *grip-tester* (2020)

Data da medição	Trecho (km)	Referência	Faixa	Intervalo de Aferição (m)	Solução Asfáltica
nov/20	519 a 518	Trecho a montante do Trecho Experimental Norte 1	1 e 2	5	Concreto Asfáltico
nov/20	518 a 517,53	Trecho Experimental Norte 1	1 e 2	5	<i>gap-graded</i>
nov/20	517,53 a 517	Trecho a jusante do Trecho Experimental Norte 1	1 e 2	5	Concreto Asfáltico
nov/20	546 a 545,37	Trecho a montante s do Trecho Experimental Norte2	1 e 2	5	Concreto Asfáltico
nov/20	545,37 a 544,72	Trecho Experimental Norte 2	1 e 2	5	<i>gap-graded</i>
nov/20	544,72 a 544	Trecho a jusante do Trecho Experimental Norte 2	1 e 2	5	Concreto Asfáltico

Fonte: A autora (2022)

Tabela 23 - Sentido Sul - Medições de atrito com equipamento *Grip-Tester* (2020)

Data da medição	Trecho (km)	Referência	Faixa	Intervalo de Aferição (m)	Solução Asfáltica
nov/20	548 a 548,78	Trecho a montante do Trecho Experimental Sul 1	1, 2 e 3	5	Concreto Asfáltico
nov/20	548,78 a 549,42	Trecho Experimental Sul 1	1, 2 e 3	5	Tratamento Superficial Duplo
nov/20	549,42 a 550	Trecho a jusante do Trecho Experimental Sul 1	1, 2 e 3	5	Concreto Asfáltico
nov/20	559 a 560	Trecho a montante do Trecho Experimental Sul 2	1, 2	5	Concreto Asfáltico
nov/20	560 a 563,30	Trecho Experimental Sul 2	1, 2	5	Tratamento Superficial Duplo
nov/20	563,30 a 564	Trecho a jusante do Trecho Experimental Sul 2	1, 2	5	Concreto Asfáltico

Fonte: A autora (2022)

A Tabela 24 apresenta as medições realizadas no ano de 2021 na pista sul para a análise da evolução dos valores de atrito no Tratamento Superficial Duplo com Asfalto modificado por borracha em relação aos dados coletados nas medições de 2020.



Tabela 24 - Sentido Sul - Medições de atrito com equipamento Grip-Tester (2021)

Data da medição	Trecho (km)	Referência	Faixa	Intervalo de Aferição (m)	Solução Asfáltica
out/21	548 a 548,78	Trecho a montante do Trecho Experimental Sul 1	1, 2	5	Concreto Asfáltico
out/21	548,78 a 549,42	Trecho Experimental Sul 1	1, 2	5	Tratamento Superficial Duplo
out/21	549,42 a 550	Trecho a jusante do Trecho Experimental Sul 1	1, 2	5	Concreto Asfáltico
out/21	559 a 560	Trecho a montante do Trecho Experimental Sul 2	1, 2	5	Concreto Asfáltico
out/21	560 a 563,30	Trecho Experimental Sul 2	1, 2	5	Tratamento Superficial Duplo
out/21	563,30 a 564	Trecho a jusante do Trecho Experimental Sul 2	1, 2	5	Concreto Asfáltico

Fonte: A autora (2022)

#### 4.7 MODELO DE PREVISÃO DE ACIDENTES

O Modelo de Previsão de Acidentes que será utilizado neste trabalho é o modelo estabelecido pelo *Highway Safety Manual* (HSM), conforme as etapas descritas no Capítulo 3. Segundo a AASHTO (2010), o método original do HSM não leva em consideração a diferença entre locais específicos dos quais ele foi desenvolvido. Nesse contexto, o modelo deve ser tratado criteriosamente e adaptado quando for aplicado em outros países, levando em conta a rede viária da região, o comportamento do motorista, a frequência e a severidade dos acidentes. A primeira etapa do método consiste na delimitação da rodovia e no enquadramento da mesma nos tipos de pista pré-estabelecidos pelo HSM.

#### **4.7.1 Período de Análise**

O método de previsão pode ser destinado para períodos passados ou futuros, isso dependerá da disponibilidade dos dados conhecidos do VDMA, da série histórica de acidentes e das condições do traçado geométrico da via. Neste estudo, optou-se pela utilização dos dados após o ano de 2012, período em que foi dado início ao plano de gestão de Segurança Viária pela concessionária responsável da rodovia em questão. Os dados do VDMA foram aplicados no modelo para cada sentido da rodovia (norte e sul) entre o período de 2013 a 2020. A rodovia Régis Bittencourt é constituída por pista dupla, segregada por um canteiro central e com alinhamentos horizontais distintos em cada sentido oposto de fluxo. As próximas etapas consistem na identificação dos trechos homogêneos, adaptação do modelo à rodovia analisada por intermédio da aplicação dos fatores de calibração e pelo refinamento do modelo mediante aplicação do método Empírico de Bayes.

#### **4.7.2 Divisão da Rodovia em Trechos Homogêneos**

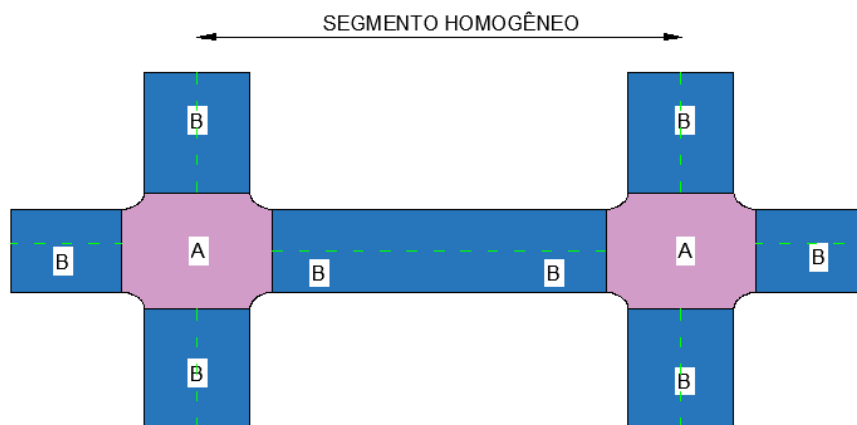
Conforme Ghadi e Török (2019), a divisão dos segmentos homogêneos é uma etapa relevante para o desenvolvimento de um MPA, por isso deve ser realizada criteriosamente. Os segmentos de uma rodovia podem diferir ao longo da sua extensão em função da descontinuidade de suas características físicas e operacionais. O modelo estatístico preditivo resulta na estimativa do número de acidentes esperado para a rodovia, que é a soma da avaliação de todos os trechos homogêneos no período de análise. Nesse sentido a metodologia utilizada na divisão dos trechos homogêneos busca obter segmentos com características constantes. Além disso, o manual do HSM recomenda que a extensão dos segmentos não seja inferior a 161 m a partir de amostra mínima de 30 a 50 trechos representativos e 100 acidentes de trânsito ao todo. Neste trabalho, ficou estabelecido que os trechos utilizados na metodologia deveriam se enquadrar dentro do trecho homogêneo da praça de pedágio 5, que está mais próxima dos trechos experimentais e com volume de tráfego constante, conforme apresentado na Tabela 13 do item 4.4.1.

Por meio das ferramentas disponíveis no programa Google Earth Pro, buscou-se percorrer quilômetro a quilômetro da rodovia através do recurso *Street View*. No sentido norte, a marcação quilométrica foi iniciada no km 500 e finalizada no km 567,82. No sentido sul, teve início no km 500 e fim no km 567,09. Após a divisão dos marcos quilométricos em marcadores individuais, iniciou-se a divisão dos segmentos homogêneos (SH) por meio de múltiplas linhas com comprimentos variáveis. O critério utilizado seguiu as recomendações do manual HSM:

- Início ou fim de uma curva horizontal. As transições espirais são consideradas parte da curva horizontal.
- Início ou fim de uma faixa adicional de ultrapassagem;
- Início ou fim de uma interseção;
- Velocidade operacional constante;
- Presença de radares e de dispositivos de iluminação.

O traçado geométrico da via foi observado através de imagem satélite do Google Earth. Nos trechos com interseções foi considerada uma distância média de 200 m a partir do centro da interseção. Conforme indicado na Figura 43, para definição dos segmentos homogêneos, faz-se necessário estimar a frequência de acidentes que ocorrem na área “B” sem que estejam influenciados diretamente à presença de uma interseção (área “A”).

Figura 43- Definição dos segmentos homogêneos em interseções



Buscou-se identificar os segmentos homogêneos (SH) em curvas e tangentes, considerando no máximo duas curvas por segmento. Além disso, foi adotada largura média de 10 m do canteiro central em toda extensão da rodovia.

Assim como a demarcação quilométrica da via em estudo, os trechos homogêneos também foram identificados por meio de marcadores individuais do início ao fim de cada segmento.

- **Pista Norte**

A Figura 44 apresenta a imagem satélite com a divisão dos segmentos homogêneos na pista norte, e em seguida a extensão de cada trecho na Tabela 25.

Figura 44 - Pista Norte: Divisão dos segmentos homogêneos



Fonte: autora (2022)

Tabela 25 - Divisão dos segmentos homogêneos pista norte

Segmento	Ponto Inicial (km)	Ponto Final (km)	Extensão do trecho (km)	Extensão do trecho em tangente (km)	Curva	OBS	Raio (km)	Raio (m)
1	500,00	500,39	0,39	0,00	1		0,39	393,52
2	500,39	500,94	0,55	0,00	1		0,55	545
3	500,94	501,46	0,52	0,00	1		0,52	521
17	508,83	509,79	0,95	0,15	2	reversas	0,80	803
18	510	511,64	1,64	0,30	2	reversas	1,34	1338,7
46	544	544,71	0,71	0,304	1	P5	0,406	406
.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.
75	567,22	567,82	0,60	0	1		0,600	600

**Total 67,82 km**

Fonte: A autora (2022)

A pista norte foi dividida em 75 segmentos com total de 67,85 quilômetros de extensão. A Tabela 26 apresenta os dados do VDMA para pista Norte entre os anos de 2013; 2014; 2015; 2016; 2017; 2018 e 2019.

Tabela 26 - Volume Diário Médio Anual da Pista Norte

Dados de volume de tráfego						
2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
18.151,19	18.294,88	17.964,58	17.201,83	18.120,50	19.022,67	19.267,67

Fonte: A autora (2022)

- **Pista Sul**

A Figura 45 apresenta a imagem de satélite com a divisão dos segmentos homogêneos na pista sul. Conforme apresentado na Tabela 27, a seguir, foram identificados 87 segmentos homogêneos que somados representaram 67,09 quilômetros.

Figura 45 - Pista Sul: Divisão dos segmentos homogêneos



Fonte: A autora (2022)

Tabela 27 - Divisão dos segmentos homogêneos pista sul

Segmento	Ponto Inicial (km)	Ponto Final (km)	Extensão do trecho (km)	Extensão do trecho em tangente (km)	Curva	OBS	Raio (km)	Raio (m)
1	500	500,56	0,56	0,56	0	tangente	0	0
2	500,56	500,95	0,39	0,39	0	tangente	0	0
3	501	501,65	0,65	0,65	0	tangente	0	0
17	509,5	510,08	0,6	0,6	0	tangente	0	0
18	510,08	510,52	0,43	0,43	0	tangente	0	0
46	531,61	532,41	0,8	0,798	0	tangente	0	0
.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.
87	566,43	567,09	0,66	0	2	reversas	0,661	661

**Total 67,09 km**

Fonte: A autora (2022)

A Tabela 28 apresenta os dados do VDMA para pista Sul entre os anos de 2014; 2015; 2016; 2017; 2018; 2019 e 2020.

Tabela 28 - Volume Diário Médio Anual da Pista Sul

Dados de volume de tráfego						
2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
18.295	17.965	17.202	18.120	19.023	19.268	22.608

Fonte: A autora (2022)

Vale ressaltar que na pista norte, o tratamento com *gap-graded* foi aplicado em 2016, sendo avaliado até 2019 e a pista sul recebeu o tratamento com TSD em 2017, sendo incluído no MPA até 2020.

#### 4.7.3 Calibração do Método HSM para os trechos críticos de acidentes

A AASHTO (2010) recomenda que períodos de calibração inferiores a três anos devem ser evitados. Desse modo, durante a etapa de atribuição dos dados de acidentes em cada trecho homogêneo, no sentido norte, foi considerado um total de três anos (2013, 2014 e 2015), descartando os dados até o ano de 2012. Já no sentido sul, foram utilizados os dados entre o período de 2014 a 2016 (antes da intervenção) e entre os anos de 2018 a 2020 (pós-intervenção). Para a aplicação do modelo foi necessária a definição dos CMF's - *Crash Modification Factors* que serão apresentados a seguir.

##### 4.7.3.1 Aplicação dos fatores de modificação – CMF's

Segundo as diretrizes do manual HSM, o modelo de previsão é desenvolvido para um número de regiões semelhantes chamados *Safety Performance Functions* (SPF's) que são desenvolvidas para condições ideais e ajustadas para os CMF's – *Crash Modification Factors*, pelos quais avaliam os segmentos homogêneos estudados em condições reais. O presente estudo se enquadra na avaliação do modelo de previsão que estime a frequência média de acidentes de uma rodovia rural de pista dupla e segregada em toda sua extensão. O efeito do volume de tráfego na frequência de acidentes é incorporado pela SPF, já o efeito das características da via de traçado geométrico e recursos de controle de tráfego são avaliados por meio dos CMF's que serão apresentados a seguir. Ressalta-se que a rodovia Régis Bittencourt apresenta alinhamentos independentes e distintos para os sentidos norte e sul.

Nesse contexto, o HSM recomenda aplicar a metodologia de rodovia dividida duas vezes, separadamente para as características de cada sentido de tráfego.

#### 4.7.3.2 CMF1rd para largura da faixa de rolamento

Conforme os dados fornecidos pela concessionária, a largura da faixa de rolamento é de 3,60 metros, por toda extensão da rodovia, podendo ser adotado um CMF igual a 1,00.

#### 4.7.3.3 CMF2rd para a largura do acostamento à direita

A largura da faixa de acostamento à direita é de 3,00 metros, por toda extensão da rodovia, nesse caso é recomendado utilizar CMF com valor de 1,00.

#### 4.7.3.4 CMF3rd para largura da divisão central

Foi considerado que não há possibilidade do cruzamento de veículos no canteiro central em toda sua extensão. Desse modo, assim como nos itens anteriores, será adotado CMF com valor de 1,00 que é o valor recomendado para barreiras físicas.

#### 4.7.3.5 CMF4rd para a presença de iluminação

A determinação do impacto do efeito de iluminação na extensão da estrada será possível determinar de forma binária, considerando a presença ou não de dispositivos de iluminação nos trechos em estudo. Essa informação foi adquirida por meio dos retrógraficos apresentados pela concessionária.

#### 4.7.3.6 CMF4rd para a presença de radares

Os sistemas com radares registram automaticamente as informações de identificação do veículo, sem a necessidade física de agentes policiais no local. A partir dos dados de localização de radares fornecidos pela concessionária, será incorporado no modelo, a presença ou não desses equipamentos.



Conforme o manual do HSM, aplica-se o valor de 0,94 para o CMF5rd em pontos que apresentam radares e 1,00 para os pontos que não apresentam radares.

#### **4.7.4 Aplicação do Método Empírico de Bayes**

A partir da calibração do modelo de previsão de acidentes, foi aplicado o Método Empírico de Bayes em cada trecho homogêneo. O método EB foi utilizado, buscando um refinamento do modelo e exclusão do viés do fenômeno de retorno à média.

#### **4.7.5 Aplicação do Método Antes e Depois.**

O método empírico de Bayes foi escolhido para verificação da efetividade das intervenções. As principais premissas abordadas no HSM para análise do modelo são: o período de estudo entre o intervalo de três a cinco anos antes e após a intervenção e a existência de um SPF desenvolvido para o tipo de elemento em análise. Adicionalmente, em relação aos dados históricos de acidentes, o modelo HSM utiliza o número total de acidentes ou o número de acidentes a determinado nível de severidade. Nos dois modelos desenvolvidos (pistas norte e sul), foi convencionado três anos no período anterior e três anos no período posterior à intervenção em relação ao número total de acidentes.

## **5 RESULTADOS**

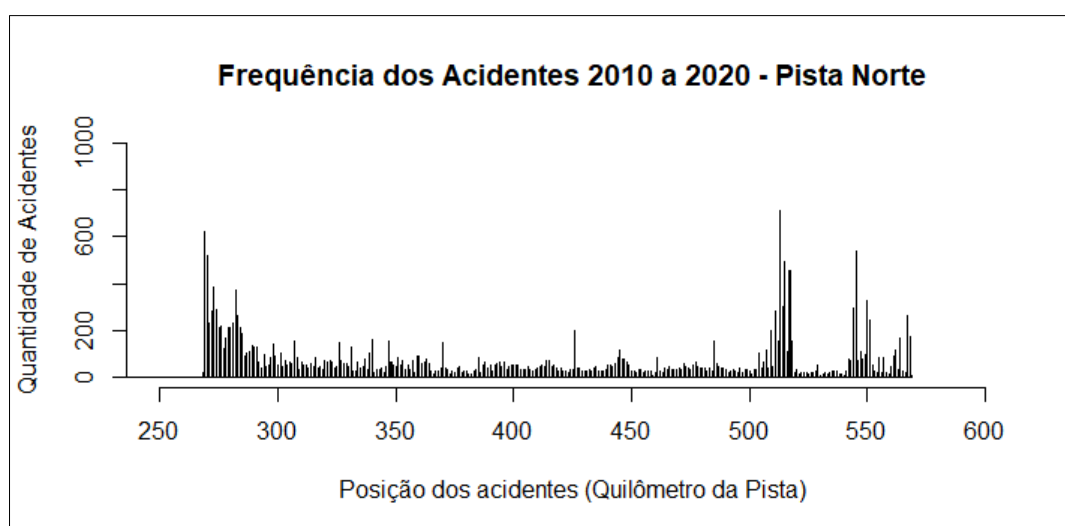
Neste capítulo serão apresentadas as análises e discussões dos resultados obtidos, incluindo um resumo dos dados levantados ao longo do período de monitoramento dos trechos experimentais (norte e sul). Para melhor compreensão, os resultados foram expostos seguindo a metodologia abordada no Capítulo 4. Para esta pesquisa os ensaios de campo foram realizados em superfícies compostas por três diferentes tipos de misturas asfálticas: O concreto asfáltico, o *gap-graded*, e o tratamento superficial duplo. Para avaliação da relação dos valores de IFI e a taxa de acidentes, buscou-se analisar uma série histórica de registro de acidentes da rodovia e dos trechos experimentais que foi disponibilizado pela concessionária. A partir das faixas de valores do IFI, utilizado

como indicador de influência de acidentes em determinado trecho da rodovia, órgãos gestores poderão avaliar as condições de aderência pneu-pavimento em pista molhada e buscar melhorias para Segurança Viária.

### 5.1 ANÁLISE PRELIMINAR DOS DADOS DE ACIDENTES

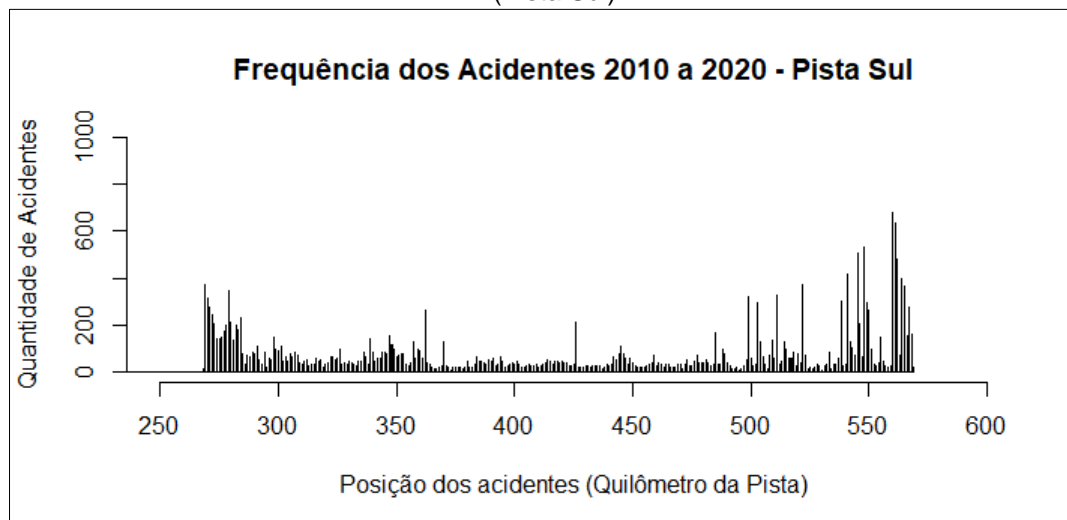
Para a realização do diagnóstico prévio da segurança da rodovia em estudo, utilizaram-se os dados de registro de acidentes e o volume diário médio em toda extensão da rodovia e nos trechos experimentais que receberam as intervenções. Durante essa etapa, os dados foram compilados e analisados no período de 2010 a 2020. Os trechos experimentais foram selecionados conforme a metodologia explicada no item 4.4. A Figura 46 e Figura 47 apresentam a distribuição de acidentes ao longo da extensão da via entre os quilômetros 268 e 569. Observa-se que os trechos experimentais onde foram feitas as intervenções com os revestimentos asfálticos selecionados foram construídos nos trechos mais críticos de acidentes, representados entre os quilômetros: 500 a 550 na pista norte e os quilômetros: 548 a 564 da pista sul.

Figura 46 - Número de acidentes na Rodovia Régis Bittencourt no período de 2010 a 2020 (Pista Norte)



Fonte: A autora (2022)

Figura 47 - Número de acidentes na Rodovia Régis Bittencourt no período de 2010 a 2020 (Pista Sul)



Fonte: A autora (2022)

A Tabela 29, apresenta o registro do histórico de ocorrência de acidentes na BR-116 no período de 2010 a 2020 com o total de 47.164 acidentes.

Tabela 29 - Quantidade de acidentes ocorridos na Rodovia Régis Bittencourt

Quantidade de acidentes	Ano										
	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Pista Régis Bittencourt - Sentido Norte	2589	2548	2453	2126	2118	2053	1806	1922	1864	2025	1775
Pista Régis Bittencourt - Sentido Sul	2520	2822	2733	2392	2095	1939	1775	1960	1718	2889	2050
Pista Régis Bittencourt - Sentido Norte e Sul	5109	5370	5186	4518	4213	3992	3581	3882	3582	3914	3825

Fonte: A autora (2022)

Para avaliar a relação entre a quantidade de acidentes e o volume de tráfego médio diário, foi necessário aplicar a taxa de acidentes por milhões de veículos x km, apresentada na Tabela 30, a seguir.

Tabela 30 - Taxa de acidentes por milhões de veículos x km

Análise de acidentes	Ano										
	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
VDMA (Norte)	10.440	10.725	11.270	11.413	11.431	10.944	10.795	11.166	11.086	11.796	11.315
VDMA (Sul)	12.013	10.775	12.080	10.859	10.895	10.525	10.297	10.816	11.271	11.773	11.293
Taxa de acidentes (Norte)	2,26	2,16	1,98	1,7	1,69	1,71	1,52	1,57	1,53	1,56	1,42
Taxa de acidentes (Sul)	1,91	2,38	2,06	2,00	1,75	1,68	1,57	1,65	1,39	1,46	1,65

Taxa de acidentes (Norte e Sul)	2,07	2,27	2,02	1,85	1,72	1,69	1,55	1,61	1,46	1,51	1,54
---------------------------------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

Fonte: A autora (2022)

A menor redução da taxa de acidentes foi referente ao ano de 2018, considerando concomitantemente as duas pistas norte e sul. Analisando a taxa de acidentes separadamente, observa-se que para a pista norte a menor taxa de acidentes ocorreu no ano de 2020, enquanto na pista sul, o ano de 2018 destacou-se pela menor taxa de acidentes. Para análise preliminar da taxa de acidentes nos trechos experimentais, quantificou-se os acidentes ocorridos apenas nesses trechos entre os anos de 2010 e 2020 (Tabela 31).

Tabela 31 - Quantidade de acidentes nos trechos experimentais

Quantidade de acidentes	Ano											
	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	
Pista Régis Bittencourt - Sentido Norte	81	128	144	80	62	44	29	35	59	41	22	
Pista Régis Bittencourt - Sentido Sul	154	269	330	39	78	143	185	215	29	90	129	
Pista Régis Bittencourt - Sentido Norte e Sul	235	397	474	119	140	187	214	250	88	131	151	

Fonte: A autora (2022)

Em seguida, calculou-se a taxa de acidentes dos trechos experimentais (Tabela 32), utilizando VDMA referente à praça de pedágio 5 com localização mais próxima dos trechos de estudo.

Tabela 32 - Taxa de acidentes por milhões de veículos x km nos trechos experimentais

Índice de acidentes	Ano											
	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	
VDMA (Norte)	8.698	8.938	9.662	9.394	9.332	8.832	8.680	9.088	9.113	9.804	9.423	
VDMA (Sul)	10.543	10.868	10.656	9.303	9.218	8.734	8.590	9.082	9.761	9.761	9.437	
VDMA (Total)	19.242	19.806	20.318	18.697	18.550	17.565	17.270	18.170	18.874	19.565	18.860	
Taxa de acidentes (Norte)	22,8	35	36,5	20,8	16,3	12,2	8,2	9,4	15,8	10,2	5,7	

Taxa de acidentes (Sul)	10,16	17,21	21,53	2,92	5,88	11,39	14,98	16,46	2,07	6,41	9,51
-------------------------	-------	-------	-------	------	------	-------	-------	-------	------	------	------

Fonte: A autora (2022)

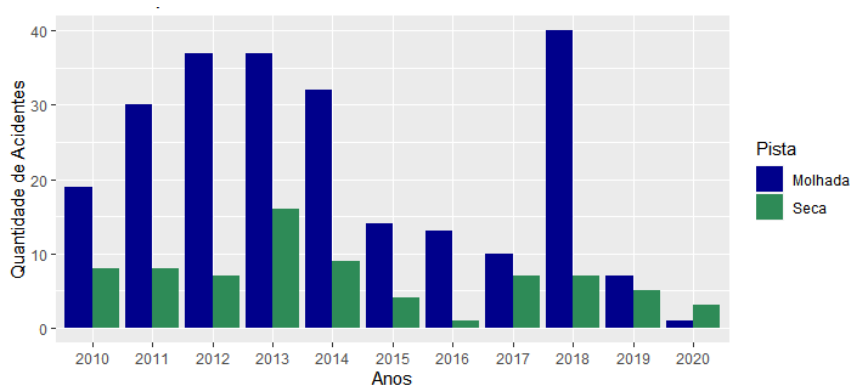
De um modo geral, como pode ser observado na Tabela 31, no sentido norte, após a aplicação do *gap-graded* em 2016, os acidentes reduziram, voltando a crescer no ano de 2018 (dois anos após intervenção).

No sentido Sul, após aplicação do TSD no ano de 2017, os acidentes reduziram consideravelmente, conforme observado no ano de 2018 (Tabela 32).

Considerando a taxa de acidentes total (norte e sul), percebe-se que a taxa de acidentes obteve uma redução significativa no ano de 2018. Entretanto, analisando as intervenções com as duas soluções asfálticas diferentes, observa-se que os trechos experimentais 1 e 2 sul com TSD construídos em 2017 pode ter contribuído para redução dessa taxa nos anos seguintes, obtendo desempenho superior em relação à taxa de acidentes obtida após aplicação do *gap-graded* da pista norte. Essa análise só poderá ser confirmada após a verificação do desempenho das soluções asfálticas aplicadas a partir dos resultados da avaliação das medições de campo abordada no item 5.3 e análise da efetividade do tratamento na seção 5.4 que abordará o método “antes-depois” do HSM para a rodovia em estudo.

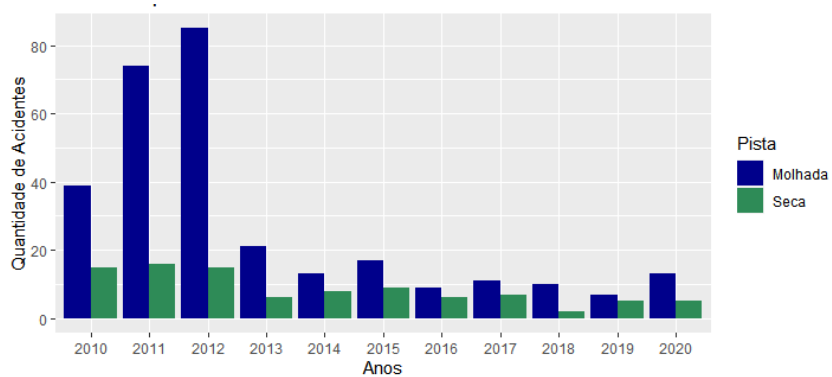
Na sequência, serão apresentados os acidentes ocorridos entre 2010 e 2020, separadamente, em condições de pista seca e pista molhada. A quantidade de acidentes dos trechos experimentais da pista norte é apresentada na Figura 48 e Figura 49 e os experimentais da pista sul na Figura 50 e Figura 51 .

Figura 48 – Quantidade de acidentes (trecho experimental norte 1)



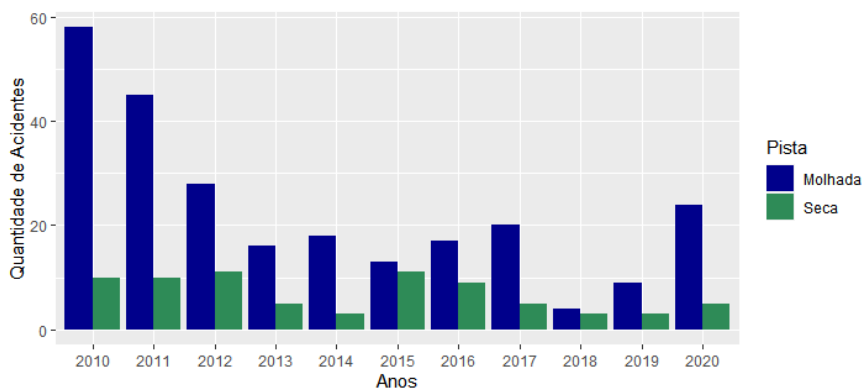
Fonte: A autora (2022)

Figura 49 - Quantidade de acidentes (trecho experimental norte 2)



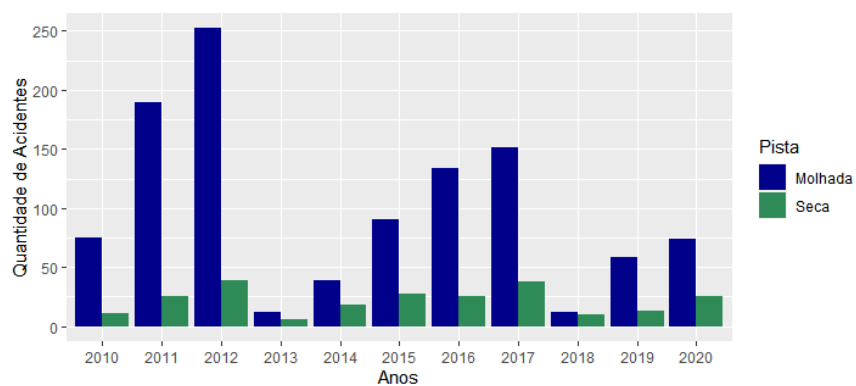
Fonte: A autora (2022)

Figura 50 - Quantidade de acidentes (trecho experimental sul 1)



Fonte: A autora (2022)

Figura 51 - Quantidade de acidentes (trecho experimental sul 2)



Fonte: A autora (2022)

De maneira geral, em ambas as pistas o número de acidentes em condições de pista molhada é consideravelmente superior em relação à condição de pista seca. No trecho experimental norte 1, houve redução do número de acidentes a partir do ano de 2015, continuando a reduzir em 2016 (ano em que ocorreu a intervenção com a solução asfáltica *gap-graded*), obtendo um considerável aumento no ano de 2018. Nos anos de 2019 e 2020 a quantidade de acidentes voltou a reduzir. No trecho experimental norte 2, os acidentes começaram a reduzir significativamente a partir do ano de 2012 (ano em que ocorreu a duplicação da rodovia), obtendo um pequeno acréscimo em 2020 para condições de pista molhada.

Para a pista sul, os acidentes ocorridos no trecho experimental sul 1, começaram a reduzir no ano de 2012, sofrendo uma queda significativa no ano de 2018. De forma similar, o trecho experimental sul 2 obteve uma queda significativa em 2013, um ano após a duplicação da rodovia em 2012 e em 2018, ano posterior à construção dos trechos experimentais da pista sul. Vale salientar, que o foco deste estudo é observar a redução dos acidentes após as intervenções adotadas, entretanto é pertinente mencionar que a duplicação da rodovia em 2012 contribuiu para segurança viária da rodovia como um todo.

## 5.2 DESENVOLVIMENTO DO MODELO DE CALIBRAÇÃO DO MÉTODO HSM EM RODOVIAS B RASILEIRAS RURAIS DE PISTA DUPLA

A aplicação do modelo preditivo do HSM envolveu os dados coletados e registrados no período de 2013 a 2019 na pista norte e 2014 a 2020 na pista sul da rodovia em estudo. Após a atribuição dos acidentes e do VDM em cada segmento homogêneo, conforme a metodologia apresentada no capítulo 4, iniciou-se o desenvolvimento do modelo HSM para a Rodovia Régis Bittencourt (BR-116). Os modelos calibrados foram realizados independentemente para cada sentido, ou seja, foram desenvolvidos dois modelos preditivos: MPA para pista norte e MPA para a pista sul.

Na primeira etapa, foi realizada a aplicação direta do método HSM, utilizando  $c_x = 1,0$ . A partir disso, calculou-se o  $N_{prev}$  por trecho homogêneo durante o período de análise.

### 5.2.1 Pista Norte

A Tabela 33 apresenta os resultados do número previsto de acidentes (pista norte), considerando a aplicação direta dos diferentes CMF's.

Tabela 33 - Número de acidentes previsto (pista norte - não calibrado)

SH	Extensão do trecho (km)	Número de acidentes (previsto)		SH	Extensão do trecho (km)	Número de acidentes (previsto)	
		Nprev acumulado (2013, 2014 e 2015)	Nprev acumulado (2017, 2018 e 2019)			Nprev acumulado (2013, 2014 e 2015)	Nprev acumulado (2017, 2018 e 2019)
1	0,39	2,72	2,69	39	1,19	7,84	8,15
2	0,55	3,59	3,72	40	0,56	3,66	3,8
3	0,52	3,43	3,56	41	0,94	6,2	6,44
4	0,53	3,49	3,62	42	0,93	6,12	6,36
5	0,42	2,73	2,84	43	0,96	6,34	6,59
6	0,31	2,07	2,15	44	0,75	4,93	5,12
7	0,4	2,64	2,74	45	0,9	5,92	6,15
8	0,53	3,49	3,63	46	0,71	4,67	4,85
9	0,28	1,85	1,92	47	1	6,17	6,4
10	0,4	2,63	2,73	48	1	6,18	6,42
11	0,45	2,96	3,08	49	1	6,58	6,83
12	1,43	9,41	9,77	50	1	6,58	6,83
13	0,56	3,69	3,83	51	1	6,58	6,83
14	0,74	4,88	5,07	52	1	6,58	6,83
15	0,38	2,49	2,59	53	0,58	3,48	3,62
16	0,83	5,48	5,69	54	0,43	2,82	2,92
17	0,95	5,72	5,94	55	1,06	6,97	7,24
18	1,64	10,78	11,2	56	0,82	5,4	5,6
19	0,982	6,46	6,71	57	0,813	5,35	5,56
20	0,39	2,59	2,69	58	0,43	2,8	2,91
21	0,88	5,8	6,03	59	0,45	2,98	3,1
22	1,12	7,34	7,63	60	0,74	4,84	5,02
23	0,94	6,16	6,4	61	0,37	2,41	2,5
24	0,44	2,88	2,99	62	0,89	5,86	6,08
25	0,52	3,43	3,56	63	1	6,58	6,83
26	1,62	10,65	11,06	64	1,06	6,95	7,22
27	1,27	8,36	8,68	65	1	6,58	6,83
28	1,5	9,87	10,25	66	0,79	5,2	5,4
29	1,3	8,55	8,88	67	0,58	3,79	3,94
30	0,97	6,38	6,63	68	0,38	2,51	2,61
31	0,97	6,38	6,63	69	0,36	2,34	2,43



32	1,91	12,59	13,08	70	0,64	4,23	4,39
33	1,96	12,87	13,37	71	0,57	3,72	3,86
34	1,34	8,8	9,14	72	0,56	3,67	3,81
35	1,44	9,47	9,84	73	0,38	2,49	2,58
36	1,43	9,4	9,76	74	0,22	1,45	1,51
37	1,4	9,21	9,57	75	0,6	3,95	4,1
38	0,68	4,5	4,67				
TOTAL (Nprev)							828

Fonte: A autora (2022)

O número de acidentes previstos quantificou um total de 828, sendo 406 no período de 2013 a 2015 e 422 no período de 2017 a 2019. Nota-se que o valor do  $N_{prev}$  (não calibrado) subestima o número de acidentes observados que apresenta um somatório de 2.871 acidentes, ou seja, a relação do  $N_{obs}$  e  $N_{prev}$  (não calibrado) apresenta um fator pontual de 3,46.

A segunda etapa envolve a calibração do modelo. A Tabela 34 apresenta o resultado de  $C_x$  obtidos separadamente nos dois períodos em estudo.

Tabela 34 - Fator de calibração (pista Norte)

N° de acidentes	Período	
	2013 a 2015	2017 a 2019
N (obs)	1545	1326
N (prev)	406	422
$C_x$	3,81	3,14

Fonte: A autora (2022)

Os resultados de  $C_x$  demonstram que o número de acidentes da rodovia em estudo é 3,81 (2013 a 2015) e 3,14 (2017 a 2019) vezes superior quando comparada as rodovias de pista dupla contempladas no modelo HSM.

### Pista Norte: Aplicação do método Empírico de Bayes (EB)

Após a determinação dos fatores de calibração, a próxima etapa consiste na calibração do modelo preditivo, obtendo os números previstos calibrados para cada segmento homogêneo. Conforme esperado após a calibração, o  $N_{prev}$  ficou muito próximo do  $N_{obs}$ . Em seguida foi aplicado o método EB por elemento individual em cada segmento homogêneo. Os resultados do número previsto de

acidentes calibrado ( $N_{prev}$ ) e o número esperado de acidentes ( $N_{esp}$ ) com aplicação do método EB são apresentados nas Tabela 35 Tabela 36.

Tabela 35 - Valores obtidos após a aplicação da calibração e do método EB (pista norte - 2013 a 2015)

SH	Extensão do trecho (km)	Número de acidentes		SH	Extensão do trecho (km)	Número de acidentes	
		2013 a 2015	2013 a 2015			2013 a 2015	2013 a 2015
		Nprev calibrado	Nesp (EB)			Nprev calibrado	Nesp (EB)
1	0,39	10,35	7,29	39	1,19	29,81	21,56
2	0,55	13,63	7,56	40	0,56	13,91	7,08
3	0,52	13,03	5,96	41	0,94	23,58	13,36
4	0,53	13,25	6,72	42	0,93	23,26	12,62
5	0,42	10,38	4,58	43	0,96	24,11	13,25
6	0,31	7,85	5,72	44	0,75	18,73	10,57
7	0,40	10,03	5,82	45	0,90	22,51	29,37
8	0,53	13,28	8,01	46	0,71	17,76	40,02
9	0,28	7,03	3,93	47	1,00	24,93	57,32
10	0,40	10	4,41	48	1,00	25,01	17,29
11	0,45	11,25	9,73	49	1,00	25,01	25,97
12	1,43	35,75	26,78	50	1,00	25,01	19,70
13	0,56	14,03	9,02	51	1,00	25,01	24,52
14	0,74	18,56	15,46	52	1,00	25,01	53,93
15	0,38	9,48	13,4	53	0,58	14,51	51,78
16	0,83	20,81	15,63	54	0,43	10,70	18,44
17	0,95	23,83	40,72	55	1,06	26,51	21,13
18	1,64	40,98	38,82	56	0,82	20,51	12,26
19	0,98	24,56	29,15	57	0,81	20,33	27,63
20	0,39	9,85	14,17	58	0,43	10,65	6,09
21	0,88	22,06	57,46	59	0,45	11,33	5,05
22	1,12	27,91	53,87	60	0,74	18,38	20,40
23	0,94	23,43	37,17	61	0,37	9,15	10,48
24	0,44	10,93	9,62	62	0,89	22,26	14,46
25	0,52	13,03	21,99	63	1,00	25,01	16,81
26	1,62	40,46	89,96	64	1,06	26,41	23,41
27	1,27	31,76	21,29	65	1,00	25,01	24,52
28	1,50	37,52	26,98	66	0,79	19,76	19,89
29	1,30	32,51	23,54	67	0,58	14,41	8,60
30	0,97	24,26	15,32	68	0,38	9,55	15,54
31	0,97	24,26	15,81	69	0,36	8,90	26,33
32	1,91	47,87	35,8	70	0,64	16,08	11,89
33	1,96	48,92	38,3	71	0,57	14,13	7,20
34	1,34	33,46	22,61	72	0,56	13,96	7,11
35	1,44	36,01	25,01	73	0,38	9,45	4,86
36	1,43	35,71	23,59	74	0,22	5,53	7,53

37	1,40	35,01	22,63	75	0,60	15,01	21,08
38	0,68	17,11	20,50				
TOTAL						1551	1563

Fonte: A autora (2022)

Tabela 36 - Valores obtidos após a aplicação da calibração e do método EB (pista norte - 2017 a 2019)

SH	Extensão do trecho (km)	Número de acidentes		TH	Extensão do trecho (km)	Número de acidentes	
		2017 a 2019	2017 a 2019			2017 a 2019	2017 a 2019
		Nprev calibrado	Nesp (EB)			Nprev calibrado	Nesp (EB)
1	0,39	2,69	7,29	39	1,19	5,33	16,63
2	0,55	3,72	7,56	40	0,56	5,61	6,99
3	0,52	3,56	5,96	41	0,94	5,32	12,23
4	0,53	3,62	6,72	42	0,93	6,70	10,04
5	0,42	2,84	4,58	43	0,96	4,84	11,08
6	0,31	2,15	5,72	44	0,75	3,21	9,42
7	0,40	2,74	5,82	45	0,90	3,31	21,18
8	0,53	3,63	8,01	46	0,71	7,98	27,52
9	0,28	1,92	3,93	47	1,00	3,71	43,57
10	0,40	2,73	4,41	48	1,00	8,18	16,26
11	0,45	3,08	9,73	49	1,00	21,97	24,60
12	1,43	9,77	26,78	50	1,00	28,86	25,56
13	0,56	3,83	9,02	51	1,00	12,02	35,14
14	0,74	5,07	15,46	52	1,00	28,14	48,55
15	0,38	2,59	13,40	53	0,58	5,92	13,59
16	0,83	5,69	15,63	54	0,43	12,16	9,06
17	0,95	5,94	40,72	55	1,06	32,58	15,44
18	1,64	11,20	38,82	56	0,82	39,07	12,53
19	0,982	6,71	29,15	57	0,813	36,03	13,50
20	0,39	2,69	14,17	58	0,43	46,64	3,58
21	0,88	6,03	57,46	59	0,45	80,73	5,22
22	1,12	7,63	53,87	60	0,74	47,47	13,12
23	0,94	6,40	37,17	61	0,37	23,03	5,81
24	0,44	2,99	9,62	62	0,89	6,41	11,43
25	0,52	3,56	21,99	63	1,00	23,20	13,10
26	1,62	11,06	89,96	64	1,06	65,27	16,31
27	1,27	8,68	21,29	65	1,00	18,76	24,60
28	1,50	10,25	26,98	66	0,79	24,53	11,07
29	1,30	8,88	23,54	67	0,58	17,18	4,76

30	0,97	6,63	15,32	68	0,38	13,61	2,41
31	0,97	6,63	15,81	69	0,36	12,15	6,46
32	1,91	13,08	35,80	70	0,64	29,06	6,86
33	1,96	13,37	38,30	71	0,57	31,13	6,48
34	1,34	9,14	22,61	72	0,56	17,43	5,77
35	1,44	9,84	25,01	73	0,38	20,43	3,78
36	1,43	9,76	23,59	74	0,22	21,00	12,21
37	1,40	9,57	22,63	75	0,60	20,52	14,16
38	0,68	4,67	20,50	-	-	-	-
TOTAL						1326	1338

Fonte: A autora (2022)

A Tabela 37 apresenta um resumo dos resultados obtidos no modelo preditivo do HSM aplicado para pista norte da rodovia Régis Bittencourt.

Tabela 37 - Resumo dos resultados obtidos no modelo preditivo (pista norte)

Nº de acidentes	2013 a 2015	2017 a 2019
Nobs	1545	1326
Nprev (calibrado)	1551	1326
Nesp (EB)	1563	1338

Fonte: A autora (2022)

Por meio dos resultados apresentados na Tabela 38, foi possível avaliar a qualidade do ajuste do modelo desenvolvido. Assim, foram aplicados os parâmetros amplamente utilizados em modelagem de acidentes: Pseudo-R<sup>2</sup> proposto por Efron (Hardin e Hilbe, 2007), o Desvio médio absoluto (MAD) e o Erro Percentual Absoluto Médio (MAPE).

Tabela 38 - Qualidade do ajuste (pista Norte)

Avaliação da qualidade do ajuste (Modelo calibrado + Método EB)	Valor obtido (2013 a 2015)	Valor obtido (2017 a 2019)
Nobs (média)	20,60	17,68
R (quadrado)	0,98	0,74
MAD	1,68	8,61
MAPE	20%	67%

Fonte: A autora (2022)

Na interpretação dos resultados, o valor de R<sup>2</sup> quanto mais próximo de um, melhor é o ajuste do modelo. Em relação aos valores obtidos no parâmetro MAD,

resultados mais próximos de zero, indicam uma menor dispersão dos dados. Conforme apresentado na Tabela 38, o modelo calibrado no período “antes” apresentou melhores resultados quando comparados ao modelo calibrado no período “depois”. Por fim, com os valores da avaliação MAPE, nota-se que no geral foram obtidos resultados satisfatórios, tomando como base os estudos de Cunto *et. al* (2015) pelo qual apresentaram resultados entre 17% e 53% e o estudo de Waihrich (2016) com MAPE variando em 41% a 66% em rodovias rurais de pista dupla.

## 5.2.2 Pista Sul

A Tabela 39 apresenta os resultados do número previsto de acidentes (pista sul), considerando a aplicação direta dos diferentes CMF's.

Tabela 39 – Número de acidentes previsto (pista sul - não calibrado)

SH	Extensão do trecho (km)	Número de acidentes (previsto)		SH	Extensão do trecho (km)	Número de acidentes (previsto)	
		Nprev acumulado (2014, 2015 e 2016)	Nprev acumulado (2018, 2019 e 2020)			Nprev acumulado (2014, 2015 e 2016)	Nprev acumulado (2018, 2019 e 2020)
1	0,56	3,38	4,15	45	0,61	3,96	4,54
2	0,39	2,52	2,89	46	0,8	5,15	5,91
3	0,65	4,17	4,78	47	0,58	3,73	4,27
4	0,32	2,07	2,38	48	1	6,07	6,96
5	0,85	5,49	6,3	49	0,98	5,93	6,8
6	0,68	4,37	5,01	50	0,68	4,37	5,01
7	0,21	1,38	1,58	51	0,6	3,86	4,42
8	0,2	1,32	1,51	52	1,47	9,49	10,88
9	0,65	4,19	4,8	53	1,26	8,14	9,33
10	0,41	2,64	3,03	54	1	5,89	6,76
11	0,65	4,22	4,84	55	1,21	7,83	8,98
12	0,66	4,27	4,9	56	1,25	8,05	9,23
13	1,22	7,87	9,02	57	1,24	8,03	9,21
14	0,41	2,65	3,04	58	0,84	5,39	6,18
15	0,47	3	3,44	59	0,49	3,16	3,62
16	0,48	3,12	3,58	60	0,77	4,97	5,7
17	0,6	3,88	4,44	61	0,68	4,39	5,04
18	0,43	2,56	2,93	62	0,52	3,33	3,82
19	0,35	2,23	2,56	63	0,41	2,65	3,04
20	0,75	4,83	5,53	64	0,9	5,84	6,7
21	0,4	2,6	2,98	65	0,6	3,85	4,41

22	0,81	5,26	6,03	66	0,42	2,71	3,1
23	0,46	2,94	3,37	67	0,4	2,55	2,93
24	0,64	4,11	4,71	68	0,42	2,71	3,11
25	0,57	3,65	4,18	69	0,5	3,21	3,68
26	0,33	2,11	2,41	70	0,56	3,63	4,16
27	1,18	7,59	8,7	71	0,54	3,49	4
28	0,68	4,4	5,04	72	0,41	2,66	3,05
29	0,65	4,17	4,78	73	0,31	2	2,3
30	0,51	3,27	3,75	74	0,65	4,17	4,78
31	0,86	5,52	6,33	75	0,72	4,66	5,35
32	1,14	7,36	8,44	76	0,87	5,63	6,46
33	0,82	5,26	6,04	77	0,88	5,67	6,5
34	0,78	5,05	5,79	78	0,81	5,21	5,97
35	0,83	5,36	6,15	79	0,94	6,05	6,94
36	1	6,46	7,41	80	1	6,44	7,38
37	0,53	3,41	3,91	81	1,42	9,17	10,51
38	1,32	8,53	9,78	82	0,78	5,06	5,81
39	1	6,46	7,41	83	0,61	3,94	4,52
40	1	6,46	7,41	84	1	6,46	7,41
41	1	6,46	7,41	85	0,7	4,55	5,21
42	0,47	3,06	3,51	86	0,73	4,71	5,4
43	0,94	6,06	6,95	87	0,66	4,27	4,9
44	0,47	3,04	3,48	-	-	-	-
TOTAL (Nprev)							863

Fonte: A autora (2022)

O número de acidentes previstos quantificou um total de 863, sendo 402 no período de 2014 a 2016 e 461 no período de 2018 a 2020. Nota-se que o valor do  $N_{prev}$  (não calibrado) subestima o número de acidentes observados que apresenta um somatório de 3.183 acidentes. Na segunda etapa envolve a calibração do modelo, a Tabela 40 apresenta o resultado de  $C_x$  obtidos separadamente nos dois períodos em estudo.

Tabela 40 - Fator de calibração (pista Sul)

N° de acidentes	Período	
	2014 a 2016	2018 a 2020
N (obs)	1758	1425
N (prev)	402	461
$C_x$	4,38	3,09

Fonte: A autora (2022)

Os resultados de  $C_x$  da pista sul demonstram que o número de acidentes da rodovia em estudo é 4,38 (2014 a 2016) e 3,09 (2018 a 2020) vezes superior quando comparada as rodovias de pista dupla contempladas no modelo HSM.

- **Pista Sul: Aplicação do método Empírico de Bayes (EB)**

Nesta etapa foi aplicado o método EB por elemento individual em cada segmento homogêneo. Os resultados do número previsto de acidentes calibrado ( $N_{prev}$ ) e o número esperado de acidentes ( $N_{esp}$ ) com aplicação do EB são apresentados na Tabela 41 e Tabela 42.

Tabela 41 - Valores obtidos após a aplicação da calibração e do método EB (pista sul - 2014 a 2016)

SH	Extensão do trecho (km)	Número de acidentes		SH	Extensão do trecho (km)	Número de acidentes	
		2014 a 2016	2014 a 2016			2014 a 2016	2014 a 2016
		Nprev calibrado	Nesp (EB)			Nprev calibrado	Nesp (EB)
1	0,56	14,79	10,89	45	0,61	17,33	8,62
2	0,39	11,02	3,53	46	0,8	22,55	14,54
3	0,65	18,23	12,31	47	0,58	16,31	8,1
4	0,32	9,07	4,32	48	1	28,26	33,48
5	0,85	24,02	14,79	49	0,98	27,61	14,28
6	0,68	19,11	29,13	50	0,68	19,11	8,95
7	0,21	6,05	2,63	51	0,6	16,87	12,34
8	0,2	5,77	10,21	52	1,47	41,52	28,08
9	0,65	18,33	16,2	53	1,26	35,61	59,71
10	0,41	11,56	8,19	54	1	28,26	19,55
11	0,65	18,46	11,14	55	1,21	34,26	30,23
12	0,66	18,68	11,89	56	1,25	35,22	40,4
13	1,22	34,42	21,07	57	1,24	35,13	36,99
14	0,41	11,62	3,79	58	0,84	23,6	18,03
15	0,47	13,14	13,04	59	0,49	13,82	12,54
16	0,48	13,65	11,08	60	0,77	21,76	42,91
17	0,6	16,96	11,72	61	0,68	19,22	18,45
18	0,43	12,27	5,53	62	0,52	14,58	8,65
19	0,35	9,75	4,55	63	0,41	11,62	3,79
20	0,75	21,12	22,26	64	0,9	25,55	65,64
21	0,4	11,36	4,42	65	0,6	16,84	43,34
22	0,81	23,01	12,44	66	0,42	11,84	11,96
23	0,46	12,86	7,94	67	0,4	11,16	15,51
24	0,64	17,98	10,25	68	0,42	11,87	27,37

25	0,57	15,97	8,6	69	0,5	14,05	4,92
26	0,33	9,21	7,49	70	0,56	15,88	7,89
27	1,18	33,21	24,18	71	0,54	15,26	8,27
28	0,68	19,25	11,54	72	0,41	11,64	4,54
29	0,65	18,23	12,95	73	0,31	8,76	1,85
30	0,51	14,3	18,26	74	0,65	18,26	16,17
31	0,86	24,17	13,15	75	0,72	20,41	45,39
32	1,14	32,22	23,55	76	0,87	24,65	24,28
33	0,82	23,03	20,08	77	0,88	24,82	14,69
34	0,78	22,1	14,88	78	0,81	22,78	12,9
35	0,83	23,46	92,44	79	0,94	26,48	14,62
36	1	28,26	25,98	80	1	28,18	95,18
37	0,53	14,92	6,05	81	1,42	40,11	87,18
38	1,32	37,34	24,12	82	0,78	22,16	33,38
39	1	28,26	15,26	83	0,61	17,24	9,23
40	1	28,26	16,87	84	1	28,26	56,53
41	1	28,26	17,4	85	0,7	19,9	26,8
42	0,47	13,4	5,32	86	0,73	20,6	18,39
43	0,94	26,51	14,64	87	0,66	18,68	18,88
44	0,47	13,28	5,97				
TOTAL						1765	1727

Fonte: A autora (2022)

Tabela 42 - Valores obtidos após a aplicação da calibração e do método EB (pista sul - 2018 a 2020)

SH	Extensão do trecho (km)	Número de acidentes		SH	Extensão do trecho (km)	Número de acidentes	
		2018 a 2020	2018 a 2020			2018 a 2020	2018 a 2020
		Nprev calibrado	Nesp (EB)			Nprev calibrado	Nesp (EB)
1	0,56	12,84	16,54	45	0,61	14,04	6,33
2	0,39	8,93	4,28	46	0,8	18,27	7,85
3	0,65	14,77	5,99	47	0,58	13,21	3,82
4	0,32	7,35	2,17	48	1	21,52	13
5	0,85	19,46	10,41	49	0,98	21,03	11,53
6	0,68	15,48	84,94	50	0,68	15,48	7,7
7	0,21	4,9	2,38	51	0,6	13,67	6,16
8	0,2	4,67	10,21	52	1,47	33,63	19,56
9	0,65	14,85	14,95	53	1,26	28,85	20,45
10	0,41	9,36	10,63	54	1	20,89	11,56
11	0,65	14,96	8,14	55	1,21	27,75	43,53
12	0,66	15,13	6,85	56	1,25	28,53	56,48
13	1,22	27,88	17,72	57	1,24	28,46	14,35
14	0,41	9,41	3,66	58	0,84	19,12	34,16
15	0,47	10,65	7,15	59	0,49	11,2	18,49
16	0,48	11,06	7,28	60	0,77	17,63	69,1



17	0,6	13,74	9,7	61	0,68	15,57	13,83
18	0,43	9,07	3,65	62	0,52	11,81	8,28
19	0,35	7,9	1,54	63	0,41	9,41	3,66
20	0,75	17,11	34,73	64	0,9	20,7	48,99
21	0,4	9,2	6,71	65	0,6	13,65	13,9
22	0,81	18,64	8,06	66	0,42	9,59	8,36
23	0,46	10,42	5,56	67	0,4	9,04	3,53
24	0,64	14,56	5,88	68	0,42	9,62	3,74
25	0,57	12,94	5,11	69	0,5	11,38	3,69
26	0,33	7,46	2,21	70	0,56	12,87	5,08
27	1,18	26,9	19,84	71	0,54	12,36	6,3
28	0,68	15,59	7,76	72	0,41	9,43	4,45
29	0,65	14,77	9,43	73	0,31	7,1	1,27
30	0,51	11,59	11,15	74	0,65	14,79	8,06
31	0,86	19,58	10,48	75	0,72	16,53	19,49
32	1,14	26,1	17,17	76	0,87	19,97	13,17
33	0,82	18,66	13,79	77	0,88	20,1	10,15
34	0,78	17,9	12,81	78	0,81	18,45	8,59
35	0,83	19	26,58	79	0,94	21,45	10,33
36	1	22,9	21,78	80	1	22,83	49,96
37	0,53	12,09	4	81	1,42	32,49	35,75
38	1,32	30,25	17,68	82	0,78	17,95	11,54
39	1	22,9	10,05	83	0,61	13,97	4,9
40	1	22,9	10,63	84	1	22,9	98,66
41	1	22,9	11,81	85	0,7	16,12	66,86
42	0,47	10,85	2,72	86	0,73	16,69	43,33
43	0,94	21,48	9,14	87	0,66	15,13	45,75
44	0,47	10,76	4,18				
TOTAL						1425	1413

Fonte: A autora (2022)

A Tabela 43 apresenta um resumo dos resultados obtidos no modelo preditivo do HSM aplicado para pista sul da rodovia Régis Bittencourt.

Tabela 43 - Resumo dos resultados obtidos no modelo preditivo (pista sul)

Nº de acidentes	2013 a 2015	2018 a 2020
Nobs	1758	1425
Nprev (calibrado)	1765	1425
Nesp (EB)	1727	1413

Fonte: A autora (2022)

Para análise da qualidade do ajuste do modelo desenvolvido para pista norte, aplicou-se os parâmetros: Pseudo-R<sup>2</sup>, MAD e MAPE, conforme apresentados na Tabela 44, a seguir:

Tabela 44 - Qualidade do ajuste (pista sul)

Avaliação da qualidade do ajuste (Modelo calibrado + Método EB)	Valor obtido (2014 a 2016)	Valor obtido (2018 a 2020)
Nobs (média)	20,20	16,37
R (quadrado)	0,82	0,87
MAD	7,24	6,18
MAPE	21%	47%

Fonte: A autora (2022)

Os resultados apresentados na Tabela 44 estão próximos aos valores de referência para os estudos de calibração do modelo HSM encontrados na literatura: R (quadrado) = 0,76 dos estudos apresentados por D' Agostino (2014), MAD = 5,54 a 7,81 em Waihrich (2016) e MAPE entre 17% e 53% em Cunto *et al* (2015). O valor obtido de MAD igual a 7,24 no período de 2014 a 2016 e 6,18 no período de 2018 a 2020 indica uma maior dispersão dos dados para o local de estudo.

### 5.3 APLICAÇÃO DO MODELO ANTES E DEPOIS (MÉTODO - HSM)

Nessa seção será apresentada a análise da efetividade do tratamento após a construção dos trechos experimentais, utilizando o modelo “antes e depois” com aplicação do método Empírico de Bayes. Recomenda-se a avaliação do tratamento no período de três anos antes e depois (AASTHO, 2010). Nesse sentido, a determinação do período de estudo foi concebida da seguinte maneira:

- Pista Norte: 2013 a 2015 (“antes”) e 2017 a 2019 (“depois”).
- Pista Sul: 2014 a 2016 (“antes”) e 2018 a 2020 (“depois”).

#### 5.3.1 Pista Norte

##### Período “antes”

Durante esta etapa, buscou-se avaliar a efetividade da intervenção dos segmentos receberam o tratamento, utilizando  $C_x = 3,81$ . Os resultados obtidos na análise do período “antes” com aplicação do *gap-graded* nos trechos experimentais são apresentados na Tabela 45 .

Tabela 45 - Resumo dos resultados obtidos período antes (pista Norte)

Trecho Experimental	Nobs	Nesp (EB)
Norte 1	112	79
Norte 2	74	53

Fonte: A autora (2022)

### Período “depois”

Em uma avaliação prévia, utilizou-se o valor de  $C_x = 3,14$  para estimativa do número esperado de acidentes nos trechos experimentais no período de três anos após aplicação do *gap-graded* (Tabela 46).

Tabela 46 - Valores obtidos no modelo após aplicação do método EB (pista norte - período depois)

Trecho Experimental	Nobs	Nesp	Razão de desigualdade	Efetividade da intervenção
Norte 1	104	94	1,11	-11%
Norte 2	42	39	1,08	-8%

Fonte: A autora (2022)

A estimativa da eficácia da segurança do tratamento em cada segmento homogêneo é representada pela coluna “efetividade da intervenção”. Os valores obtidos negativos (-11% e -8%) indicam aumento do número de acidentes.

Em seguida, para análise da efetividade não viesada, foi aplicado o método antes e depois com o método empírico de Bayes conforme a metodologia apresentada na seção 5.3 deste trabalho. A Tabela 47 apresenta a efetividade geral não viesada do tratamento.

Tabela 47 - Análise da efetividade do tratamento (gap-graded)

Trecho Experimental	Nobs	Nesp	Efetividade da intervenção (SE) não viesada	DP( SE) não viesada	NS
Norte 1	104	82	-7,8%	11,79	0,66
Norte 2	42	55			

Fonte: A autora (2022)

Verifica-se que o valor de NS (0,66), menor que 1,7 representa que o efeito do tratamento não foi significativo em um intervalo de confiança de 90%.

Na análise apresentada na Tabela 47, foi confirmado o resultado que já era esperado durante as medições de atrito em campo para o *gap-graded* no período de três anos após a intervenção.

A verificação apresentada dos estudos de Carvalho (2019) após um ano do tratamento para o mesmo material, indicou uma redução do número de acidentes em torno de 54% no trecho experimental norte 1 e uma redução de 38% no período de um ano após o tratamento no trecho experimental norte 2. Isso demonstra que o *gap-graded* modificado com polímero utilizado na Pista Norte, contribuiu com a redução de acidentes até um ano após a sua aplicação. Depois deste período, esse tipo de solução asfáltica apresentou baixa resistência ao desgaste para rodovia em estudo com tráfego pesado de veículos.

### 5.3.2 Pista Sul

#### Período “antes”

O resultado do número esperado de acidentes com a aplicação do método empírico de Bayes no período “antes” ( $C_x = 4,38$ ) da pista Sul é apresentado na Tabela 48.

Tabela 48 - Resumo dos resultados obtidos período antes (pista Sul)

Trecho Experimental	Nobs	Nesp (EB)
Sul 1	71	50
Sul 2	335	237

Fonte: A autora (2022)

#### Período “depois”

Em uma avaliação prévia, utilizou-se o valor de  $C_x = 3,09$  para estimativa do número esperado de acidentes nos trechos experimentais no período de três anos após aplicação do TSD (Tabela 49).

Tabela 49 - Valores obtidos no modelo após aplicação do método EB (pista sul - período depois)

Trecho Experimental	Nobs	Nesp	Razão de desigualdade	Efetividade da intervenção
Sul 1	38	35	1,09	-9%
Sul 2	148	138	1,08	-8%

Fonte: A autora (2022)

Em uma análise prévia do modelo apresentada na Tabela 49, foi indicada uma baixa efetividade para o TSD aplicado. Seguindo as mesmas premissas adotadas na pista norte, aplicou-se o método antes e depois com o método empírico de Bayes para análise da efetividade não viesada. A Tabela 50 apresenta a efetividade geral não viesada do tratamento.

Tabela 50 - Análise da efetividade do tratamento (TSD)

Trecho Experimental	Nobs	Nesp	Efetividade da intervenção (SE) não viesada	DP (SE) não viesada	NS
Sul 1	38	58	43,31	4,97	8,72
Sul 2	148	272			

Fonte: A autora (2022)

O valor de NS superior a 2,0 representa o efeito do tratamento significativo em um intervalo de confiança de 95%.

Buscou-se verificar a efetividade estatística nos dois trechos experimentais da pista sul após três anos de intervenção, por meio de uma análise comparativa dos resultados obtidos por Linhares (2021) e os resultados obtidos neste estudo de 2022 (Tabela 51).

Tabela 51 - Análise comparativa da efetividade do TSD - pista Sul

Trecho Experimental	Efetividade da intervenção (%) (Linhares, 2021)	Efetividade da intervenção (%) (2022)
Sul 1	57,0	33,93
Sul 2	57,8	45,59

Fonte: A autora (2022)

Observa-se que mesmo aplicando métodos estatísticos diferentes, os resultados após três anos de intervenção foram aproximados. Linhares (2021) avaliou a efetividade da aplicação do TSD pelo teste de Mann-Whitney enquanto na presente Dissertação de Mestrado aplicou-se o método antes-depois do HSM com a combinação do método Empírico de Bayes.

## 5.4 AVALIAÇÃO DAS MEDIÇÕES DE CAMPO

### 5.4.1 Avaliação da macrotextura

Conforme apresentada na Tabela 52, o trecho experimental norte 1, a macrotextura do *gap-graded* foi classificada como “grossa” na faixa 1 e “média” na faixa 2. No trecho experimental norte 2, a macrotextura foi classificada como “média” nas duas faixas de rolamento. Os estudos de Aps (2006) encontrou boa correlação entre o ensaio de mancha de areia com o valor calculado de IFI (F60). Esses cálculos serão apresentados no item 5.5.3.

Nota-se que o TSD apresentou resultados satisfatórios para a macrotextura, classificada majoritariamente como “muito grossa”. O Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos (DNIT, 2006) não recomenda o cálculo do IFI para misturas que obtiveram diâmetros do ensaio de mancha de areia superiores a 1,2 mm. Entretanto, essa recomendação não inviabiliza a verificação deste parâmetro. Assim, o IFI será calculado para os dois materiais apresentados neste estudo.

Tabela 52- Classificação da macrotextura

GAP-GRADED			TSD		
Trecho 01 - Norte	Faixa	Classificação	Trecho 01 - Sul	Faixa	Classificação
km 518 a km 517,53	1	Grossa	km 548,78 a km 549,42	1	Muito grossa
km 518 a km 517,53	2	Média	km 548,78 a km 549,42	2	Muito grossa
Trecho 02 - Norte	Faixa	Classificação	Trecho 02 - Sul	Faixa	Classificação
km 545,37 a km 544,720	1	Média	km 560 a km 563,30	1	Muito grossa
km 545,37 a km 544,720	2	Média	km 560 a km 563,30	2	Muito grossa

Fonte: A autora (2022)

### 5.4.2 Avaliação da microtextura

A microtextura foi avaliada por meio do *Grip Number* (GN) obtido pelas medições de campo realizadas em 17 de novembro de 2020 e 06 de outubro de 2021. Inicialmente, foi observada a consistência do banco de dados fornecido pelo *RoadBase*, software de pesquisa *griptester* para estradas, por meio da ferramenta estatística *boxplot*, a qual é apresentada uma distribuição em que se destaca a média e a dispersão dos dados conhecidos como “*outliers*”. O *boxplot* é um método simples de realizar uma distribuição empírica de dados. A caixa representa o intervalo de valores entre o final do primeiro e início do último quartil, os quadrados representam a média de valores obtida do conjunto de pontos e o traço horizontal representa a mediana, isto é, torna-se possível identificar a dispersão de um grupo de dados e as diferenças das características entre eles. Os valores dos ensaios de campo foram agrupados em função das características de revestimento asfáltico aplicadas nos trechos experimentais, da seguinte maneira:

- CA (montante) - concreto asfáltico medido no trecho a montante da localização dos trechos experimentais das pistas norte e sul;
- *Gap-graded* - medido nos trechos experimentais da pista Norte;
- TSD - medido nos trechos experimentais da pista Sul.
- CA (jusante) - concreto asfáltico medido a jusante da localização dos trechos experimentais das pistas norte e sul;

A Tabela 53 apresenta a esquematização das medições em cada trecho experimental durante a coleta de dados com equipamento *grip-tester*.

Tabela 53 - Esquematização das medições em campo com *grip-tester*

Pista Norte - Trecho 01				Pista Norte - Trecho 02			
Trecho (km)	Referência	Faixa	Solução Asfáltica	Trecho (km)	Referência	Faixa	Solução Asfáltica
519 a 518	Trecho montante ao Trecho Experimental 01	1 e 2	CA (Montante)	546 a 545,37	Trecho montante do Trecho Experimental 02	1 e 2	CA (Montante)
518 a 517,53	Trecho Experimental 01	1 e 2	Gap-Graded	545,37 a 544,72	Trecho Experimental 02	1 e 2	Gap-Graded
517,53 a 517	Trecho jusante do Trecho Experimental 01	1 e 2	CA (Jusante)	544,72 a 544	Trecho jusante do Trecho Experimental 02	1 e 2	CA (Jusante)
Pista Sul Trecho 01				Pista Sul - Trecho 02			
Trecho (km)	Referência	Faixa	Solução Asfáltica	Trecho (km)	Referência	Faixa	Solução Asfáltica

548 a 548,78	Trecho montante do Trecho Experimental 01	1, 2 e 3	CA (Montante)	559 a 560	Trecho montante do Trecho Experimental 02	1 e 2	CA (Montante)
548 a 549,42	Trecho Experimental 01	1, 2 e 3	TSD	560 a 563,30	Trecho Experimental 02	1 e 2	TSD
549,42 a 550	Trecho jusante do Trecho Experimental 01	1, 2 e 3	CA (Jusante)	563,30 a 564	Trecho jusante do Trecho Experimental 02	1 e 2	CA (Jusante)

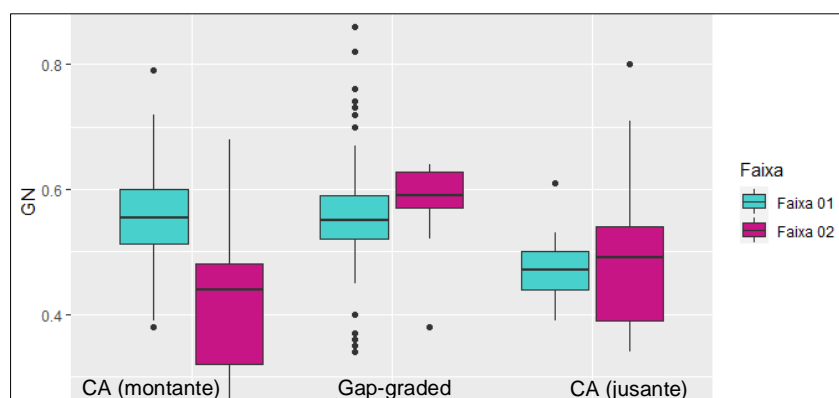
Fonte: A autora (2022)

### 5.4.2.1 Pista Norte

- Trecho Experimental Norte 1

Na Figura 52 - Trecho experimental norte 1 - (km 519 a km 517) Figura 52 são apresentadas as medições do trecho experimental norte 1, faixas 01 e 02.

Figura 52 - Trecho experimental norte 1 - (km 519 a km 517)



Fonte: A autora (2022)

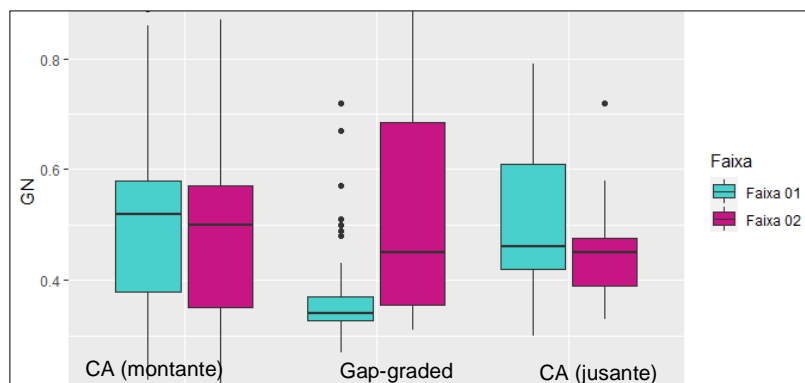
Na faixa 01, observa-se que o valor da mediana GN do CA (montante) e *gap-graded* estão relativamente próximos, possuindo valor de 0,55, enquanto o CA (jusante) apresenta valor de 0,46. Observa-se que na faixa 02, a mediana do GN do *gap-graded* apresenta maior valor (0,58), enquanto o CA (montante) e o CA (jusante) apresentam valores de 0,44, e 0,48, respectivamente. Além disso, nota-se que o CA apresenta valor de GN inferior ao CA da faixa 01, isso pode estar associado a uma maior solicitação ao tráfego na faixa 02, utilizada preferencialmente por veículos pesados.

- Trecho Experimental Norte 2:



Na Figura 53 são apresentadas as medições da faixa 01 e 02 do trecho experimental norte 2.

Figura 53 - Trecho experimental norte 2 -(km 546 – km 544)



Fonte: A autora (2022)

Na faixa 01 do trecho experimental norte 2, durante a medição em campo foi observado que foram executados reparos (remendos) utilizando concreto asfáltico. Conforme observado na Figura 53, nota-se que a mediana do material representado pelo *gap-graded* é inferior na faixa 01, além disso, os dados contêm “outliers” mais dispersos em relação aos demais, distorcendo um pouco mais a simetria da caixa. Isso já era esperado devido aos reparos com remendo, observados durante as medições em campo, feitos nessa faixa da pista. De maneira similar, na faixa 02, o valor do GN (*gap-graded*) está próximo do *grip-number* do concreto asfáltico (jusante).

#### 5.4.2.2 Pista Sul

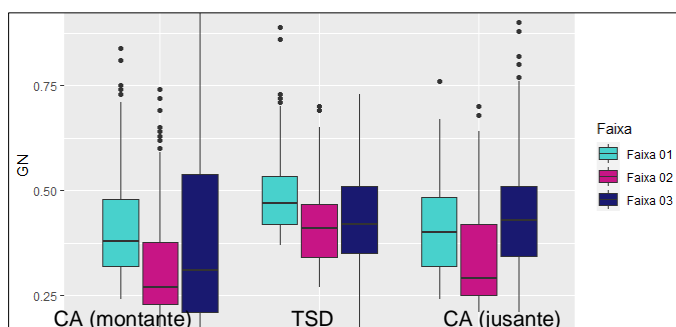
- Trecho Experimental sul 1 (km 548 a km 550)

Na Figura 54, são apresentadas as medições das faixas 01, 02 e 03 do primeiro trecho experimental do sentido sul com medições de atrito realizadas em outubro de 2020. No intuito de observar o valor de atrito ao decorrer do tempo, foram realizadas novas medições na pista sul em novembro de 2021 (Figura 55). Por conta das falhas apresentadas na operação do *Road-base* (software do *grip-tester*) durante as medições da faixa 03, serão apresentadas para fins

comparativos as medições realizadas nas faixas 01 e 02 do trecho experimental sul 1 no ano de 2021.

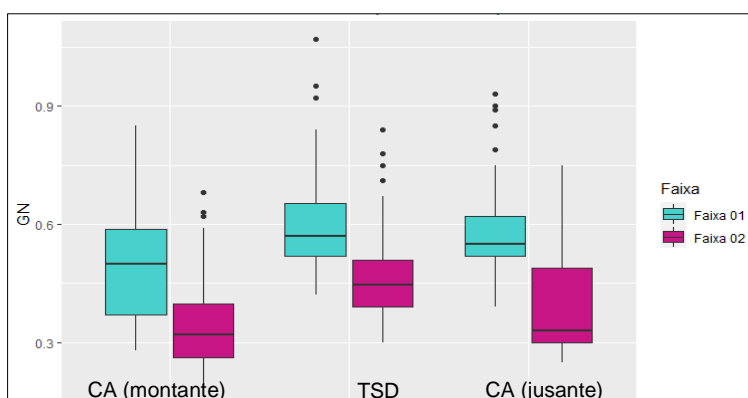
Ressalta-se que o *gap-graded* estudado na pista norte foi substituído pelo concreto asfáltico, desse modo, impossibilitando a realização de novas medições.

Figura 54- Trecho experimental sul 1 (2020) - (km 548 – km 550)



Fonte: A autora (2022)

Figura 55- Trecho experimental sul 1 (2021) - (km 548 – km 550)



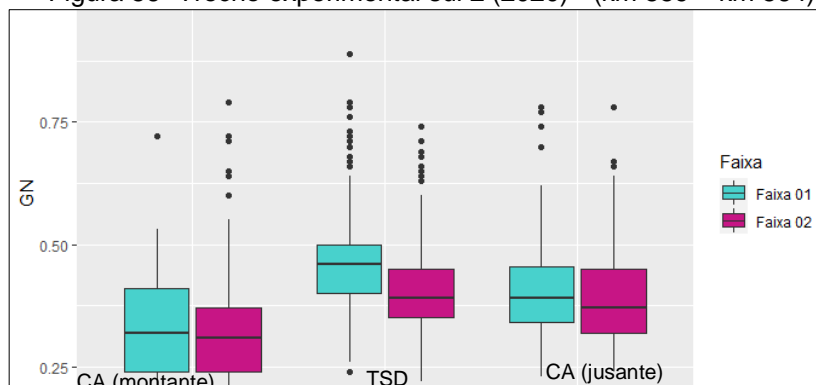
Fonte: A autora (2022)

Pelos resultados obtidos na Figura 54 e Figura 55 observa-se que a mediana dos valores do GN para as faixas 01 e 02 do TSD são superiores em relação ao CA, apresentando pouca variação de atrito entre os anos de 2020 e 2021. Na faixa 03 (Figura 54), o *grip-number* representado pelo TSD obteve valor mais aproximado ao CA. O menor desempenho do atrito nessa faixa, pode estar relacionado à faixa 03 ser submetida ao tráfego mais pesado de caminhões.

• Trecho Experimental sul 2 (km 559 a km 564)

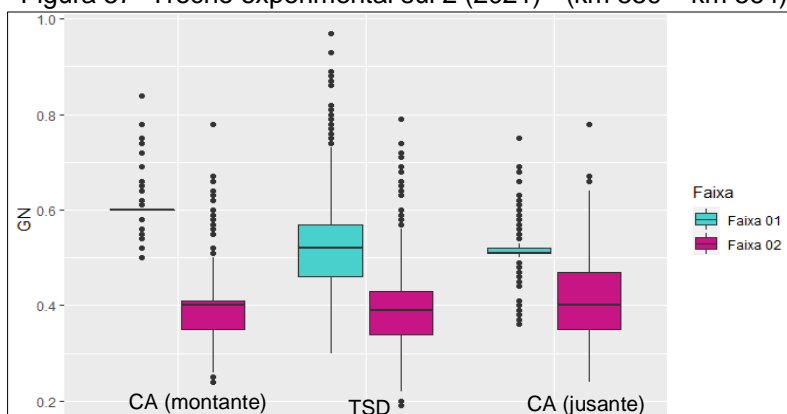
Na Figura 56 e na Figura 57 estão representadas as medições das faixas 01 e 02 do segundo trecho experimental do sentido sul nos anos de 2020 e 2021, respectivamente.

Figura 56- Trecho experimental sul 2 (2020) - (km 559 – km 564)



A autora (2022)

Figura 57- Trecho experimental sul 2 (2021) - (km 559 – km 564)

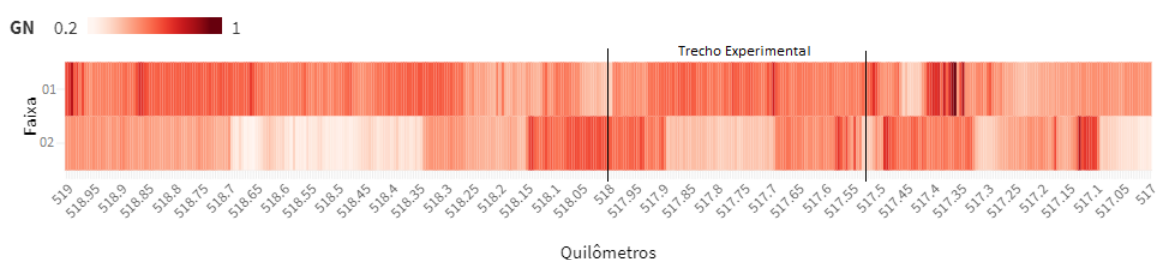


A autora (2022)

Pela Figura 56 e Figura 57, observa-se que o TSD apresenta mediana superior ao CA em ambas as faixas durante o intervalo de aproximadamente um ano das medições de atrito. Foi possível constatar em campo que devido à solicitação maior ao tráfego na faixa 02, era esperado que os valores de GN obtidos nessa faixa fossem inferiores quando comparados aos valores de GN obtidos na faixa 01. De um modo geral, observa-se que o TSD e o gap-graded nos trechos sem reparos alcançaram melhores resultados em relação ao CA, corroborando para o aumento da resistência à derrapagem. A partir das medições realizadas em 2021, nota-se que o CA reduziu o valor do atrito consideravelmente, enquanto o TSD apresentou pouca alteração.

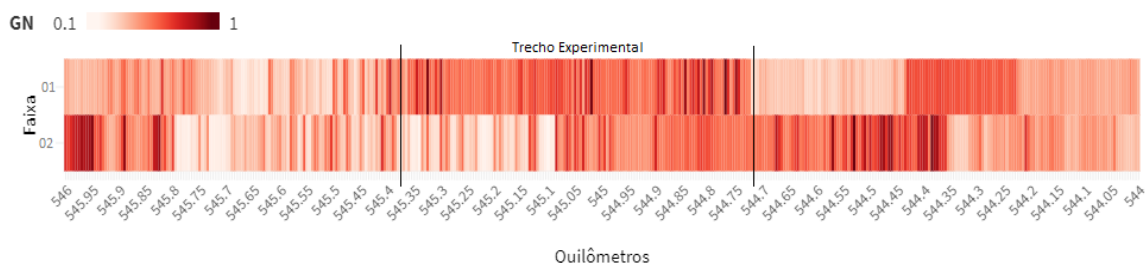
Para melhor representação visual da distribuição dos dados de atrito por quilômetro da rodovia, foram elaborados gráficos *heatmap* (mapa de calor). As cores mais escuras representam valores superiores de atrito, enquanto as mais claras, valores inferiores. Dessa forma, é possível identificar os quilômetros e em quais faixas do pavimento o valor de atrito obteve melhor e pior desempenho em relação a microtextura. Os gráficos *heatmap* são apresentados na Figura 58 e na Figura 59 para pista norte e na Figura 60, Figura 61 para pista sul.

Figura 58- *grip-number* – Trecho experimental norte 1 – Aplicação de *gap-graded*



Fonte: A autora (2022)

Figura 59 - *grip-number* – Trecho experimental norte 2 – Aplicação de *gap-graded*



Fonte: A autora (2022)

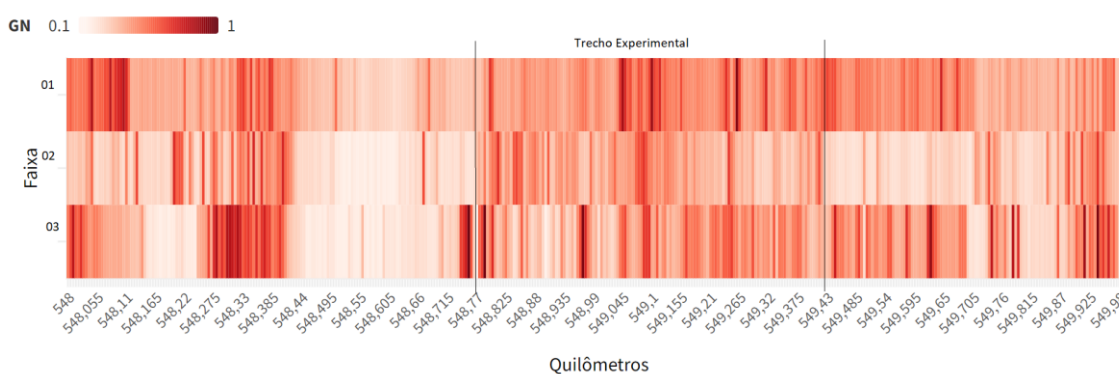
Conforme observado na Figura 58 e na Figura 59, nota-se que o *gap-graded* aplicado nos trechos experimentais norte 1 e norte 2, o *grip-number* apresentou valores aproximados a 0,55 a 0,60 em toda sua extensão, diferentemente da faixa 2 que está representada por cores mais claras, indicando baixos valores de atrito entre os quilômetros 517,9 e 517,7 (trecho experimental norte 1) e 545,35 a 545,1 (trecho experimental norte 2).

Em relação ao pavimento de concreto asfáltico, observa-se que o CA da faixa 1 (montante) apresentou melhor desempenho de atrito quando comparado

a faixa 2 no trecho experimental norte 1 que indicou GN na ordem de 0,3. Já o concreto asfáltico (jusante) na faixa 1 está representado por baixos valores de atrito entre os quilômetros 517,37 a 517,05.

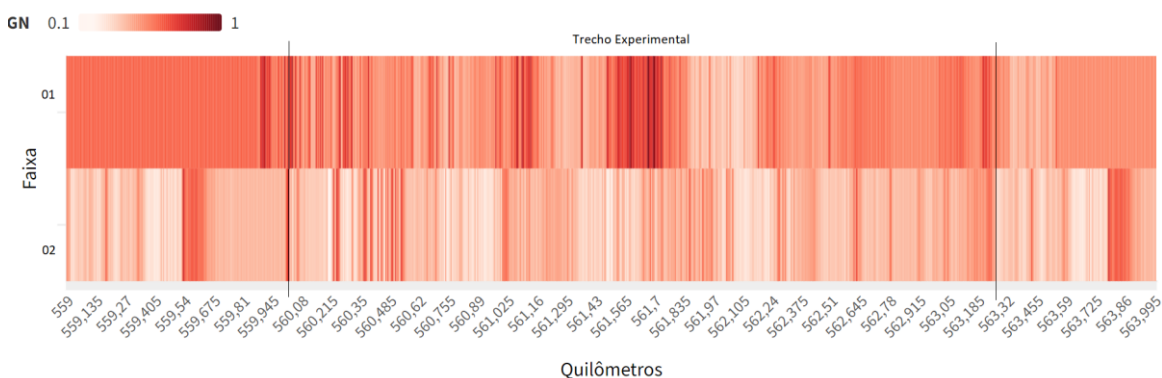
Pela, Figura 59 nota-se que o concreto asfáltico (jusante) avaliado durante as medições de atrito do trecho experimental norte 2, obteve melhor desempenho em relação ao trecho montante ao gap-graded.

Figura 60- *grip-number* – Trecho experimental sul 1 – Aplicação de TSD



Fonte: A autora (2022)

Figura 61- *grip-number* – Trecho experimental sul 2 – Aplicação de TSD



A autora (2022)

No trecho experimental sul 1 (Figura 60) é possível observar que o TSD apresentou valores aproximados em toda sua extensão, representando pouca variação de atrito entre as três faixas.

No trecho experimental sul 2 (Figura 61), nota-se que o TSD aplicado na faixa 1 obteve melhor desempenho de atrito com GN entre 0,5 e 0,7 em relação ao TSD aplicado na faixa 2, indicando GN entre 0,3 e 0,5.

Em relação ao pavimento de concreto asfáltico montante e jusante ao TSD, no trecho experimental sul 1, por meio da representação do *heatmap* é possível notar baixo desempenho quando comparado ao TSD. De um modo geral, tanto o concreto asfáltico assim como o TSD apresentaram melhores desempenhos na faixa 1, uma vez que, na faixa 2 os valores de atrito estão relativamente próximos em ambos os materiais e com baixos valores de *grip-number* representados pelas cores mais claras.

Calha frisar que devido a microtextura estar associada às características do agregado, não era esperado que um mesmo material obtivesse valores divergentes de *grip-number* por faixa. Entretanto, pelos resultados apresentados, é relevante investigar em que parcela a macrotextura pode influenciar nas medições de microtextura mediante equipamento *grip-tester*, tendo em vista que em condições de pista molhada pode-se afirmar que uma macrotextura mais rugosa é mais benéfica para a aderência pneu-pavimento, por conta do escoamento da água através dos canais da macrotextura, enquanto o topo dos agregados mantém contato com o pneu em velocidades mais elevadas. Além disso, foi observado durante as medições em campo que os motoristas excediam a velocidade permitida da via, porém deve-se evidenciar que a medida da microtextura é um importante fator nas operações a baixa velocidade.

Com base dos estudos de Aps (2006), observou-se uma pequena tendência de revestimentos asfálticos mais antigos apresentarem uma macrotextura mais aberta que os revestimentos mais novos, isso por conta da desagregação ou exposição de agregados, o que torna a superfície mais rugosa. Nesse sentido, supondo que a macrotextura influencie no resultado do *grip-number* obtido pelo equipamento *grip-tester*, é cabível que valores de GN sejam distintos para um mesmo material aplicado em faixas de pista diferentes. Além do desgaste da mistura asfáltica, deve-se ressaltar que em declives os pneus dos caminhões e as forças tangenciais tendem a acelerar o processo do polimento de agregados.

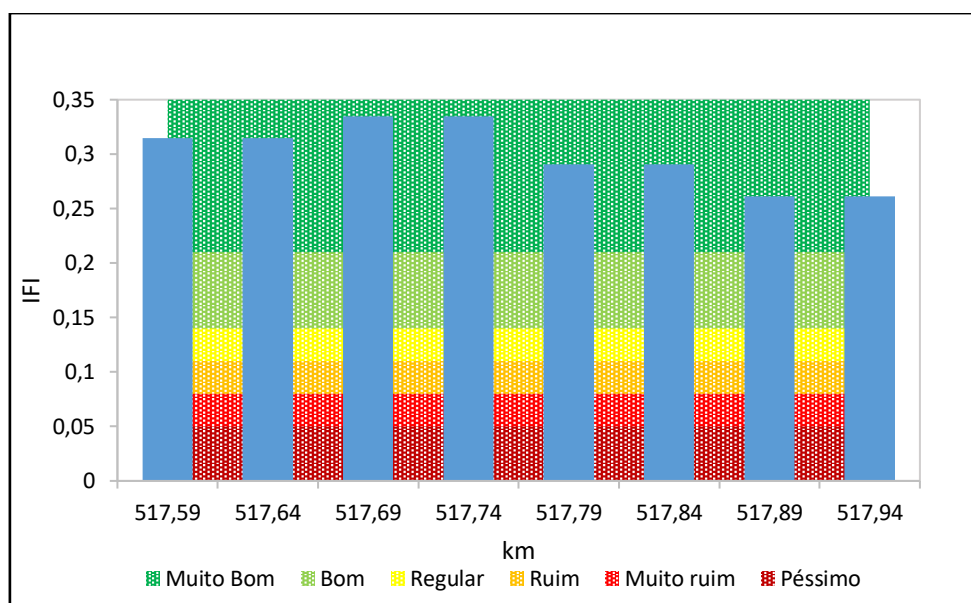
#### **5.4.3 International Friction Index (IFI)**

A análise dos materiais aplicados nos trechos experimentais da pista norte e sul será baseada nos valores das faixas de classificação de IFI. A Figura 62, Figura 63, Figura 64 e a Figura 65 apresentam os resultados obtidos da

classificação IFI (SP, F60) calculados para o *gap-graded* e a Figura 66, Figura 67, Figura 68, Figura 69 e Figura 70, os valores obtidos do IFI para o tratamento superficial duplo. Em todos os gráficos foram demarcadas as faixas de classificação IFI proposta por Aps (2006).

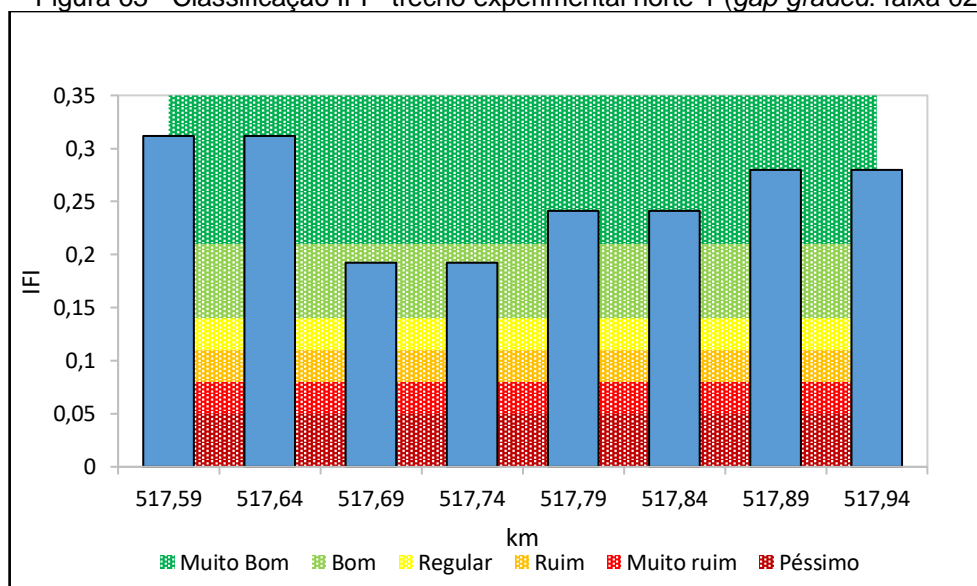
Os valores de IFI calculados para o trecho experimental norte 1 (faixa 01) e norte 1 (faixa 02), classificado entre os valores limites “muito bom”, são apresentados na Figura 62 e Figura 63, respectivamente.

Figura 62 - Classificação IFI - trecho experimental norte 1 (*gap-graded*: faixa 01)



Fonte: A autora (2022)

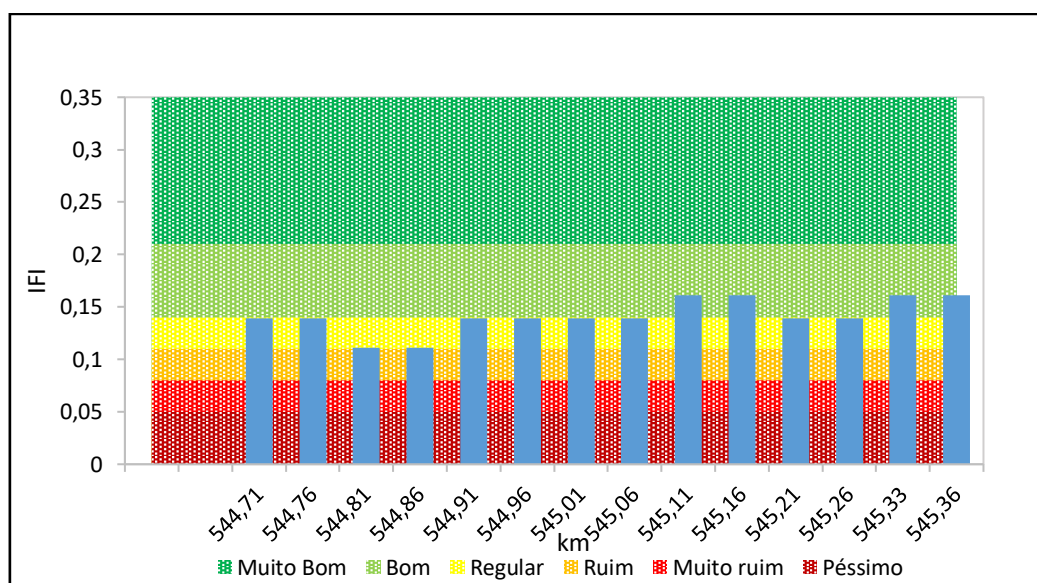
Figura 63 - Classificação IFI - trecho experimental norte 1 (*gap-graded*: faixa 02)



Fonte: A autora (2022)

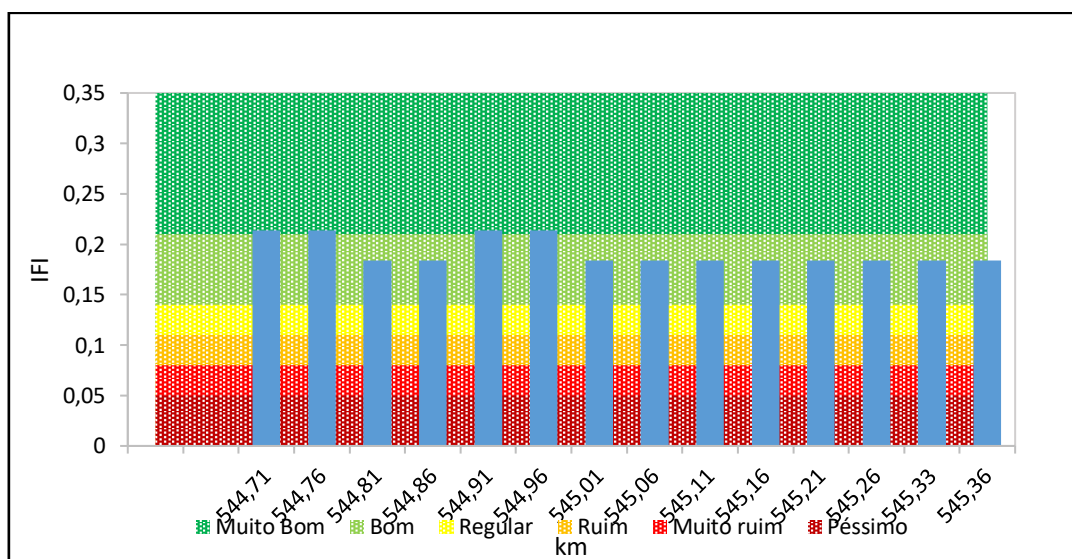
Na faixa 02 do trecho experimental norte 1, observa-se uma variação entre as faixas “bom” e “muito bom”. Os resultados de IFI para o trecho experimental norte 1 podem estar associados à elevada macrotextura obtida no ensaio de mancha de areia. A Figura 64 e a Figura 65 apresentam os resultados da classificação IFI do trecho experimental norte 2.

Figura 64 - Classificação IFI - trecho experimental norte 2 (*gap-graded*: faixa 01)



Fonte: A autora (2022)

Figura 65 - Classificação IFI - trecho experimental norte 2 (*gap-graded*: faixa 02)

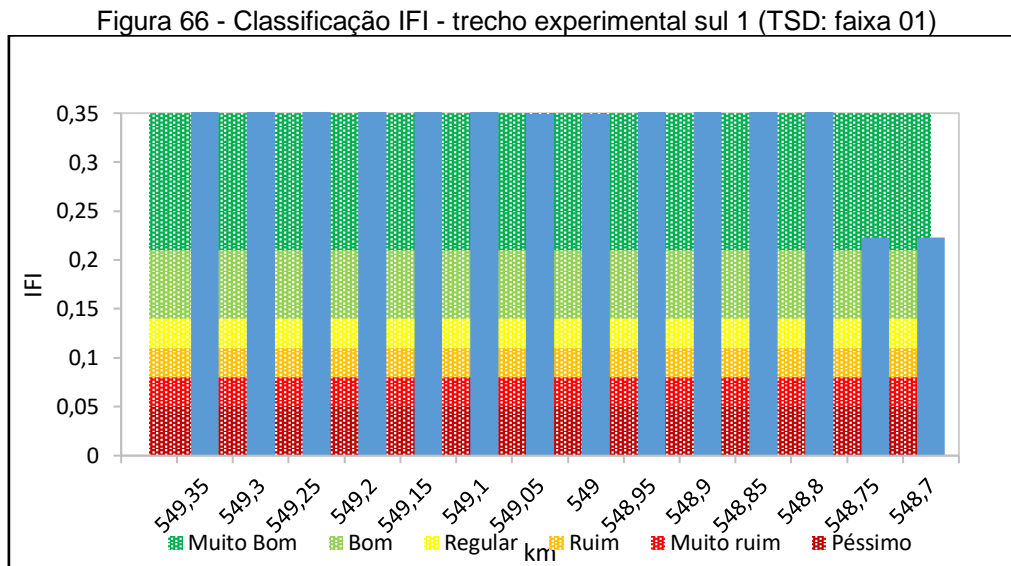


Fonte: A autora (2022)



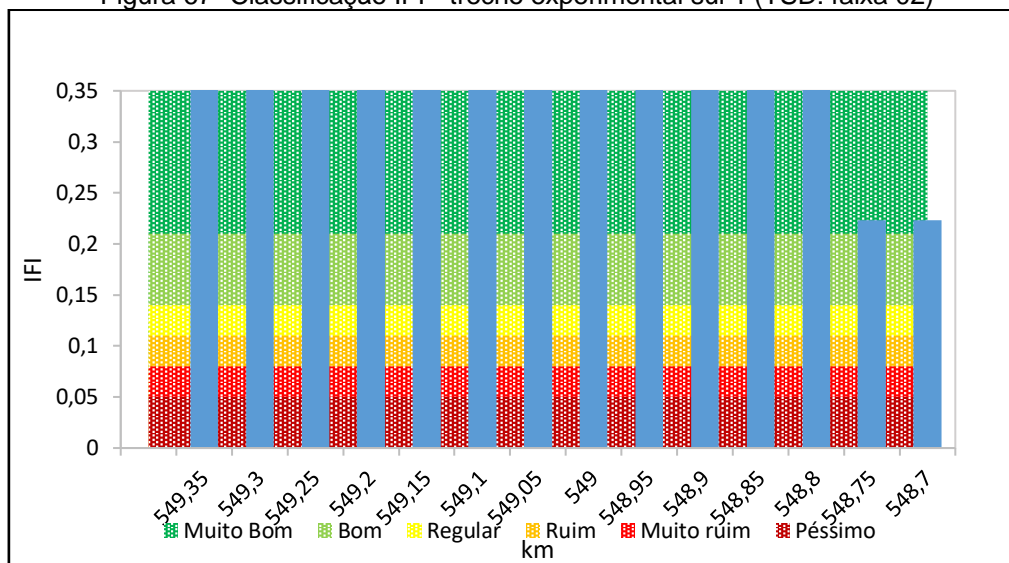
Na faixa 01 do trecho experimental norte 2, observa-se uma variação entre as categorias regular e bom, sendo classificado majoritariamente como “regular”. Ressalta-se que nesse trecho houve reparos com remendo corroborando essa redução do valor de IFI. Já na faixa 02, o IFI foi classificado como “bom”, e foi observado que devido a macrotextura nessa faixa ter sido classificada como “grossa”, resultou em uma melhoria para categorização IFI, ou seja, mesmo que as condições de reparo com remendo na faixa 02 tenha colaborado na redução do GN avaliado na microtextura, a boa classificação da macrotextura influenciou no valor IFI como “bom”. De um modo geral, o *gap-graded* apresentou resultados aquém do esperado quanto à classificação IFI, cujo objetivo seria obter bom desempenho quanto ao atrito, drenagem e melhor aderência pneu-pavimento. Entretanto, é importante mencionar que os trechos experimentais foram construídos em meados de 2016 e sofreram intervenções com reparos nos anos posteriores além do desgaste natural devido ao uso.

A Figura 66, Figura 67 e Figura 68 apresentam os valores de IFI calculados para o trecho experimental sul 1.



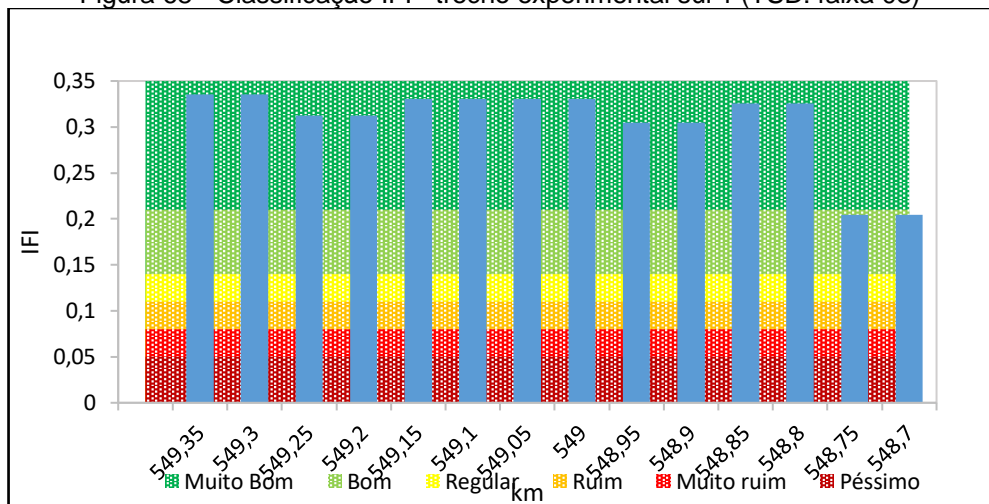
Fonte: A autora (2022)

Figura 67- Classificação IFI - trecho experimental sul 1 (TSD: faixa 02)



Fonte: A autora (2022)

Figura 68 - Classificação IFI - trecho experimental sul 1 (TSD: faixa 03)

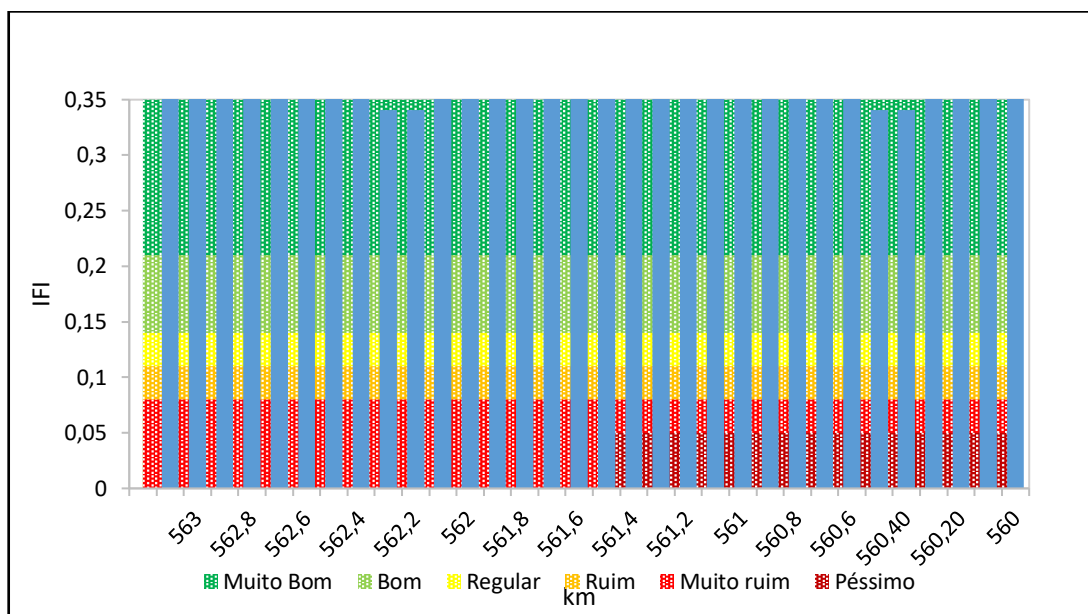


Fonte: A autora (2022)

Conforme apresentado na Figura 66, Figura 67 e Figura 68 observa-se que o valor IFI permaneceu com poucas alterações entre as faixas 1, 2 e 3 obtendo classificação majoritária “muito bom”.

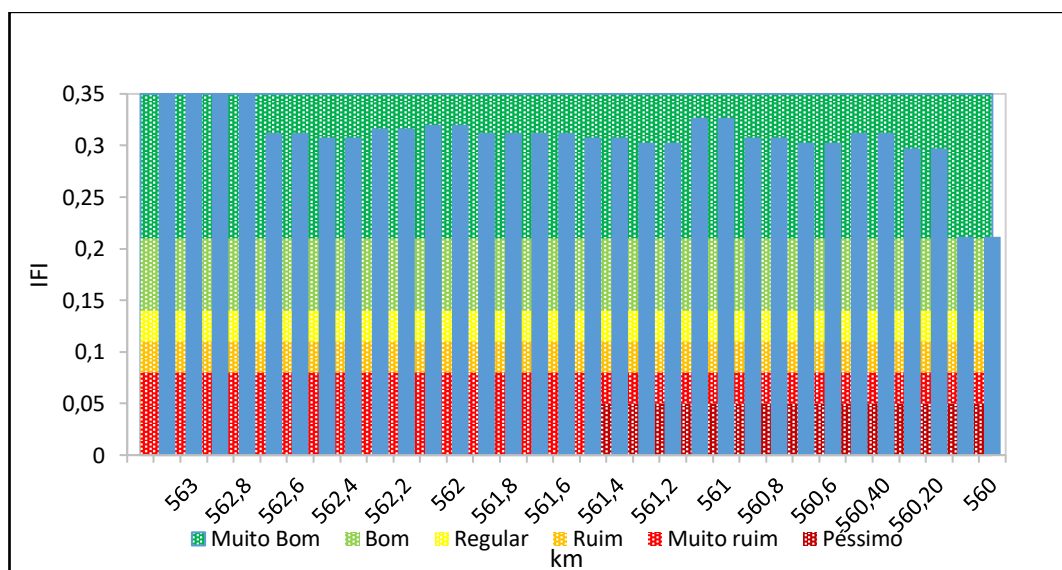
A Figura 69 e Figura 70, a seguir, apresentam a classificação IFI do trecho experimental sul 2, faixas 01 e 02, respectivamente.

Figura 69 - Classificação IFI - trecho experimental sul 2 (TSD: faixa 01)



Fonte: A autora (2022)

Figura 70 - Classificação IFI - trecho experimental sul 2 (TSD: faixa 02)



Fonte: A autora (2022)

Por meio dos valores apresentados na Figura 69 e na Figura 70, foi possível observar que a classificação IFI do tratamento superficial duplo para o trecho experimental sul 2 foi enquadrada na classificação “muito bom”. De maneira análoga ao *gap-graded*, observa-se forte influência da macrotextura na classificação IFI, uma vez que o TSD obteve macrotextura “muito grossa”.

Por meio da análise da classificação IFI entre os diferentes materiais asfálticos aplicados, observa-se que o tratamento superficial obteve melhores resultados, corroborando para o melhor desempenho na aderência pneu-pavimento.

## 6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS

O presente trabalho propôs avaliar a efetividade dos materiais asfálticos aplicados nos trechos experimentais das pistas norte e sul da rodovia Régis Bittencourt (BR-116), buscando uma análise da segurança viária por meio da aplicação do método “antes e depois” do *Highway Safety Manual*. É importante ressaltar que as duas pistas analisadas apresentam traçados independentes e segregados em toda extensão da rodovia. Desse modo, foram desenvolvidos dois modelos estatísticos preditivos de acidentes viários, um para cada sentido de tráfego.

O modelo estatístico preditivo de acidentes proposto pelo HSM não incorpora as características do tipo de tratamento adotado, porém tornou-se possível realizar tal análise por meio dos resultados obtidos nas medições de atrito (em campo) realizadas nos trechos experimentais.

Por meio dos resultados apresentados no capítulo 5 foi possível observar que o *gap-graded* aplicado na pista norte, apresentou boas condições iniciais de aderência até um ano posterior à intervenção. Após três anos, esse tipo de revestimento asfáltico já apresentava desgastes significativos, observados durante as medições em campo e pelos baixos valores de atrito. Esse fato foi constatado na avaliação da efetividade da segurança (não viesada) pela aplicação do método Empírico de Bayes que considerou o tratamento aplicado no modelo norte irrelevante para segurança viária.

Por outro lado, os resultados obtidos no modelo aplicado à pista sul, constatou redução dos sinistros de trânsito em até 45%, representando efetividade significativa do tratamento em um intervalo de confiança de 95%. Pela análise dos resultados obtidos das medições de atrito na pista sul, o TSD-AMB apresentou bons resultados de aderência após três anos de aplicação, com valores de atrito relativamente superiores em relação ao *gap-graded*.

Por fim, o objetivo geral da pesquisa em analisar a efetividade da textura superficial na redução de acidentes rodoviários e a melhoria nos aspectos de segurança viária, após incorporação do *gap-graded* e do Tratamento Superficial Duplo (TSD) foi alcançado por meio da associação dos resultados obtidos de atrito dos materiais utilizados no tratamento aos valores apresentados no modelo “antes e depois”.

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesse trabalho, buscou-se avaliar o efeito da textura superficial do pavimento na segurança viária. Para isso, foram selecionados trechos críticos de acidentes nos sentidos norte e sul da Rodovia Régis Bittencourt – BR 116.

A partir da construção dos trechos experimentais com as intervenções nos trechos críticos de acidentes nos anos de 2016 para a pista norte (aplicação de *gap-graded*) e 2017 na pista sul (aplicação de TSD), torna-se possível avaliar a efetividade destas intervenções ao longo do tempo. Para tanto, utilizou-se a base de dados dos registros de acidentes e VDMA no período de 2010 a 2020.

Por meio das pesquisas encontradas na revisão de literatura sobre os fatores que influenciam na ocorrência de acidentes de trânsito e aplicação de modelos estatísticos para previsão de acidentes, buscou-se estabelecer as relações de textura e atrito que afetam o desempenho da segurança viária.

O procedimento metodológico para avaliação das condições de superfície do pavimento (macrotextura e microtextura) e os principais equipamentos de medições foram apresentados. E, por fim, foi desenvolvido o modelo “antes” e “depois” do *Highway Safety Manual* calibrado às condições da rodovia em estudo.

Pelos resultados obtidos, observa-se que, de um modo geral, as intervenções obtiveram um efeito imediato de redução do número de acidentes logo após a construção dos trechos experimentais, entretanto, ao longo do tempo percebe-se que o TSD apresentou melhor desempenho quanto ao atrito, em comparação ao *gap-graded*, que sofreu intervenções com reparos nos anos seguintes à sua aplicação.

O modelo estatístico preditivo desenvolvido neste trabalho e calibrado do HSM, aplicando a metodologia “antes” e “depois” com a combinação do método Empírico de Bayes, indicou que o TSD reduziu 33,93% dos acidentes no trecho experimental sul 1 e 45,39% dos acidentes no trecho experimental sul 2 após três anos de intervenção. Por outro lado, o MPA desenvolvido indicou que o *gap-graded* não contribuiu efetivamente para segurança viária após três anos de intervenção, apresentando resultados satisfatórios após um ano da aplicação do tratamento.

Com o cumprimento dos objetivos propostos e o conhecimento gerado durante a presente pesquisa, foi possível avaliar a efetividade das misturas asfálticas apresentadas, na redução do número de acidentes viário. Desse modo, a pesquisa científica tem um papel fundamental na investigação de soluções asfálticas assertivas na aderência pneu-pavimento em rodovias de tráfego pesado e com alto índice de acidentes, contribuindo no processo de gestão da segurança viária e promovendo dispositivos seguros aos usuários do sistema de transportes, principalmente em rodovias brasileiras.

## 7.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Aplicar o modelo desenvolvido nesta dissertação em outros trechos rodoviários, no intuito de se avaliar o ajuste do modelo calibrado em um diferente tipo de amostragem;
- Aplicar o modelo desenvolvido em condições de pista seca e molhada;
- Desenvolver modelo estatístico preditivo de acidentes que busque incorporar valores obtidos de atrito em diferentes tipos de revestimentos asfálticos;
- Investigar características geométricas e operacionais da rodovia, visando alcançar um melhor ajuste do modelo proposto do HSM em rodovias rurais de pista dupla do Brasil;
- Desenvolver modelos estatísticos preditivos próprios de acidentes com as características da Rodovia Régis Bittencourt para fins de comparação ao modelo calibrado do Highway Safety Manual.

## REFERÊNCIAS

AASHTO - AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **Highway Safety Manual**, v. 1, Washington, D.C., 2010.

AASHTO - AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **Highway Safety Manual**, v. 2, Washington, D.C., 2010.

AASHTO - AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **Highway Safety Manual**, v. 3, Washington, D.C., 2010.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10697/2020. Pesquisa de sinistros de trânsito - Terminologia. Rio de Janeiro, Brasil: 2020.

ABPV – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PAVIMENTAÇÃO. Informativo Técnico sobre Avaliação da Resistência à Derrapagem através de Aparelhagem Portátil. **Boletim Técnico** nº18, 1999.

ANAC - AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. “**Anuário Estatístico do Transporte Aéreo**”, 2009.

ANDRESEN, A.; WAMBOLD, J. C. **Friction Fundamentals, Concepts and Methodology**. Montreal, Canadá, 1999.

APS, M. **Classificação da aderência pneu-pavimento pelo índice combinado IFI – International friction index para revestimentos asfálticos**. Tese (Doutorado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006.

ARAÚJO, C. A. A. Bibliometria: evolução histórica e questões atuais. **Em Questão**. v. 12, n. 1, p. 11-32, 2006.

ARAÚJO, J. A. **As Condições de Atrito Superficial das Pistas de Aeroportos como Parte da Gerência de Pavimentos**. Rio de Janeiro: Dissertação (Mestrado). Universidade Federal Fluminense, 1994.

ASTM – E2380M-15. **Standard Test Method for Measuring Pavement Texture Drainage Using an Outflow Meter**. West Conshohocken, Pennsylvania, United States: American Society for Testing and Materials, 2019.

ASTM E1845 – 15. **Standard Practice for Calculating Pavement Macrotexture Mean Profile Depth**. West Conshohocken, Pennsylvania, United States: American Society for Testing and Materials, 2015.

ASTM E303–93. **Standard Method for Measuring Frictional Properties Using The British Pendulum Tester**. ASTM International: American Society for Testing and Materials, 1998.

ASTM E274-15. **Standard Test Method For Skid Resistance of Paved Surfaces Using A Full-Scale Tire**. ASTM International: American Society for Testing and Materials, 2020.

ASTM E670–94. **Standard Test Method for Side Force Friction on Paved Surfaces Using the Mu-meter**. ASTM International: American Society for Testing and Materials, 2000.

ASTM E867-06. **Standard Terminology Relating to Vehicle-Pavement Systems**. ASTM International: American Society for Testing and Materials, 2012.

ASTM E965–15. **Standard Test Method for Measuring Pavement Macrotexture Depth Using a Volumetric Technique**. West Conshohocken, Pennsylvania, United States: American Society for Testing and Materials, 2015.



ASTM E1960-98. **Standard Practice for Calculating International Friction Index of a Pavement Surface**. West Conshohocken, Pennsylvania, United States: American Society for Testing and Materials, 1998.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Projeto de Redução da Morbimortalidade por Acidente de Trânsito**, v. 2. Brasília, 2002.

BRAGA, R. E. M; ROTHER, T. E; BICAS, A. E. H. Fatores de impacto, outros índices bibliométricos e desempenhos acadêmicos. *Arq Bras Oftalmol*, 2002.

BERNUCCI, L. L. B.; MOTTA, L. M. G., CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica: formação básica para engenheiros**. Abeda, Petrobrás. Rio de Janeiro, 2008.

BROWN, J. R.; DANT, R. P. The Theoretical Domains of Retailing Research: A Retrospective. *Journal of Retailing*, v. 85, n. 2, p. 113-128, 2009.

CALTRANS - CALIFORNIA DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. **Maintenance Technical Advisory Guide (MTAG)**. Sacramento, 2007.

CARDOSO, A. L. J.; KATO, H. T. Análise das publicações sobre capacidades dinâmicas entre 1922 e 2012: discussões sobre a evolução conceitual e as contribuições dos autores de maior notoriedade da área. *Revista de Administração Mackenzie*, v. 16, 2015.

CARVALHO, F. S. **Análise da textura superficial de pavimentos asfálticos sua influência na ocorrência de acidentes de tráfego rodoviário em condição de pista molhada**. São Paulo: Dissertação: (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2019.

CNT - CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Acidentes rodoviários e infraestrutura**. Brasília, CNT, SEST, SENAT. 2018.

CNT - CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Acidentes rodoviários: policiamento, infraestrutura e custo econômico**. Brasília, CNT. 2019.

COLONY, D. C. **Influence of Traffic, Surface Age and Environment on Skid Number**. Department of Transportation. Ohio, United States of America, 1992.

COSTA, S. L. **Influência da aderência pneu-pavimento nos conflitos veiculares microssimulados**. Fortaleza: Dissertação: (Mestrado). Programa de pós-graduação em engenharia de transportes da Universidade Federal do Ceará, 2017.

CUNTO, F. SOBREIRA, L.; FERREIRA, S. Assessing the transferability of the Highway Safety Manual predictive method for urban roads in Fortaleza City, Brasil. **Journal of Transportation Engineering**, v. 141, p. 8, 2015.

D' AGOSTINO. Investigating transferability and goodness off fit of two different approaches of segmentation and model form for estimating safety performance of motorways. **Procedia Engineering**, v. 84, p. 622, 2014.

DEINFRA–SC-ES–P.12/16. **Pavimentação: Tratamentos Superficiais Asfálticos por Penetração – à quente**. Santa Catarina, Brasil: Departamento de Infraestrutura do Estado de Santa Catarina, 2016.

DER - DEPARTAMENTO DE ESTRADAS E RODAGEM. **Notas Técnicas de Projeto Geométrico**. São Paulo, 2006.

DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de pavimentação**. Brasília, 2006.

DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Anuário Estatístico das Rodovias Federais**. Brasília, 2010.

ELVIK, R.; WANVIK, P. O.; JOHANSSON, O. A new method for assessing the risk of accident associated with darkness. **Journal Accident Analysis and Prevention**, v. 41, p. 809-815, 2009.

GU, F.; WATSON, D.; MOORE, J.; TRAN, N. Evaluation of the benefits of open graded friction course: Case study. **Construction and Building Materials**, v. 189, p. 131-143, 2018.

FERREIRA, P. N. **Avaliação da macrotextura de trechos pavimentados de rodovias estaduais situadas na região insular do município de Florianópolis**. Santa Catarina: Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina, 2002.

FWA, T. F.; ONG, G. P. Wet-pavement hydroplaning risk and skid resistance: analysis. **Journal of Transportation Engineering**, v. 134, p. 182-190, 2008.

FRAMARIM, C. da SILVEIRA. **Procedimento para monitorar medidas voltadas à redução dos acidentes no sistema viário**. Porto Alegre: Dissertação (mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003.

GARFIELD, EUGENE. Citation Indexes for Science: A New Dimension in Documentation through Association of Ideas. **Science**, v. 122, p. 108-111, 1955.

GILLESPIE, T. D. **Fundamentals of Vehicle Dynamics**. Society of Automotive Engineers, Inc, 400 Commonwealth Drive. Warrendale, 1992.

GUEDES, V; BORSCHIVER, S. **Bibliometria: uma ferramenta estatística para a gestão da informação e do conhecimento, em sistemas de informação, de comunicação e de avaliação científica e tecnológica**. Salvador: CINFORM – Encontro Nacional de Ciência da Informação, 2005.

GUERRAZI, L. A. C.; BRANDÃO, M. M.; JUNIOR, H. C.; LOURENCO, C. E. Pesquisa em Marketing e Estratégia nos Principais Periódicos Internacionais:

Um Estudo Bibliométrico sobre Publicações no Século XXI. **Revista Ibero-Americana de Estatística – RIAE**, 2015.

HALL, J. W.; SMITH, K. L.; TITUS-GLOVER, L.; WAMBOLD, J. C.; YAGER, T. J.; RADO, Z. **Guide for pavement friction**. National Cooperative Highway Research Program – NCHRP Web-Only Document 108, Final Report for NCHRP Project 01-43, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, DC, USA, 2009.

HARWOOD, D. W., COUNCIL F.M., E. HAUER, W.E. HUGHES, e VOGT A. **Prediction of the Expected Safety Performance of Rural Two-Lane Highways**. Office of Safety Research and Development, Federal Highway Administration, 2000.

HASSAN, M. E.; SMITH, G. W.; Ott, R. S.; FAULKNER, D. B.; FIRKINS, L. D.; EHRHART, E. J.; SCHAEFFER, D. J. Reversibility of the reproductive toxicity of gossypol in peripubertal bulls. **Theriogenology**, v. 61, n. 6, p. 1171-1179, 2004.

HAUER, E.; HARWOOD, D. W.; COUNCIL, F. M.; GRIFFITH, M.S. The empirical Bayes method for estimating safety: A Tutorial. **Transportation Research Record**, v. 1784, p. 126–131, 2002.

HENRY, J. J. Evaluation of pavement friction characteristics, a synthesis of highway practice. **Transportation Research Board**, Washington, p. 72, 2000.

HERNANDEZ-SAENZ, A. M.; CARO, S.; ARÁMBULA-MERCADO, E.; MARTIN, E. A.; Mix design, performance and maintenance of Permeable Friction Courses (PFC) in the United States: State of the Art. **Construction and Building Materials**, v. 111, p. 358-367, 2016.

HOMEM, T. R. **Comportamento de Misturas asfálticas Porosas com Ligantes Modificados por polímeros e Adição de Fibras**. Porto Alegre: Dissertação (mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2002.

IPEA - INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. **Estimativa dos custos dos acidentes de trânsito no Brasil com base na atualização simplificada das pesquisas anteriores do Ipea**. Brasília, Brasil: IPEA, 2015.

ITF- INTERNATIONAL TRANSPORT FORUM. **Zero Road Deaths and Serious Injuries: Leading a Paradigm Shift to a Safe System**. Paris, França: OECD Publishing, 2016.

KOKKALIS, A. G.; PANAGOULI, O. K. Fractal evaluation of pavement skid resistance variations. I: surface wetting. **Chaos, Solitons & Fractals**, v. 9, n. 11, p. 1875-1890, 1998.

KRAFFT, M.; GOETZ, O.; MANTRALA, M.; SOTGIU, F.; TILLMANN, S. The Evolution of Marketing Channel Research Domains and Methodologies: An Integrative Review and Future Directions. **Journal of Retailing**, v. 91, n. 4, p. 569-585, 2015.

LI, L.; GULER, S. I.; DONNEL, E. T. Pavement Friction Degradation Based on Pennsylvania Field Test Data. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 2639, p. 11-19, 2017.

LINHARES, G. R. **Redução de acidentes rodoviários por derrapagem com emprego de Tratamento Superficial Duplo com Asfalto Modificado por Borracha**. São Paulo: Dissertação: (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2021.

LORD, D. Modeling motor vehicle crashes using Poisson-gamma models: examining the effects of low sample mean values and small sample size on the estimation of the fixed dispersion parameter. **Accident Analysis and Prevention**, v. 38, n. 4, p. 751-766, 2006.

LORD, D., KUO, P. Examining the effects of site selection criteria for evaluating the effectiveness of traffic safety countermeasures. **Accident; Analysis and Prevention**, 2012.

LUGÃO, W. G. **Análise da aderência entre pneu e pavimento com camada porosa e atrito no Aeroporto internacional Tancredo Neves – MG**. Minas Gerais: Tese (doutorado). Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Viçosa, 2018.

LUM, H.; REAGAN, J. A. Interactive Highway Safety Design Model: Accident Predictive Module. **Public Roads**. Federal Highway Administration Research and Technology. U.S Department of Transportation, 1995.

LYON, C.; PERSAUD, B.; MERRIT, D. Quantifying the safety effects of pavement friction improvements – results from a large-scale study, **International Journal of Pavement Engineering**, v. 19, p. 145-152, 2018.

MACHADO, C. A. S.; TAKIYA, H.; YAMAMURA, C., L., K.; QUINTANILHA, J. A. Placement of infrastructure for Urban Electromobility: A Sustainable Approach. **Sustainability**, v. 12, n. 16, p. 6324, 2020.

MACHADO, C. A. S.; BERNUCCI, L. L. B.; CARVALHO, F. S.; ALBARRACIN, O. Y. E.; HO, L. L.; QUINTANILHA, J. A. Spatial identification of hazardous segments on rural highways considering the interaction weather-pavement surface conditions using PKDE and NKDE. **Advances in Transportation Studies: an international Journal**, v. 54, section B, p. 181-194, 2021.

MAZZON, J. A.; HERNANDEZ, J. M. C.; Produção científica brasileira em marketing no período 2000-2009. **Revista de Administração de Empresas**. v. 53, São Paulo, 2013.

MATSUMOTO, P. S. S; FLORES, E. F. **Estatística Espacial na Geografia: Um estudo dos Acidentes de Trânsito em Presidente Prudente – SP**. Departamento de Geografia da UNESP, São Paulo, 2012.

MOORE, D. F. Friction and Wear in Rubbers and Tyres. **Wear**, v. 61, p. 273-282, 1980.

MOUNCE, J. M.; BARTOSKEWITZ, R. T. Hydroplaning and Roadway Tort Liability. **Transportation Research Record**, v. 1401, p. 117, 1993.

NODARI, C. T. **Método de avaliação da segurança potencial de segmentos rodoviários rurais de pista simples**. Porto Alegre: Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003.

NOYCE, A. D.; BAHIA, H. U.; YAMBÓ, J. M.; KIM, G. **Incorporating road safety into pavement management: maximizing asphalt pavement surface friction for road safety improvements - Draft Literature Review and State Surveys**. Midwest Regional University Transportation Center, Traffic Operations and Safety (TOPS) Laboratory. Wisconsin, United States of America, 2005.

OGDEN, K. W. **Safer Roads: A Guide to Roads Safety Engineering**. Department of Civil Engineering, Institute of Transport Studies, Monash University, Melbourne, Australia, 1996.

OKABE, A.; SHIODE, S.; OKUNUKI, K. The SANET toolbox: New methods for Network Spatial Analysis. **Transactions in GIS**, v. 10, n. 4, p. 535-550, 2006.

OMS – ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DE SAÚDE. **Global status report on road safety 2015**. Genebra, Suíça, 2015.

OMS – ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DE SAÚDE. **Global status report on road safety 2018**. Genebra, Suíça, 2018.

OMS – ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DE SAÚDE. **Plano global década de ação pela segurança no trânsito 2021-2030**, 2021.

PINTO, J. I. B. R. **Caracterização superficial de pavimentos rodoviários**. Porto: Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Porto, 2003.

PONCINO, H. **Aderencia neumático-pavimento**. Conceptos Generales. Estado del Conocimiento. Boletim de lá Comission Permanente del Asfalto. N° 94, Buenos Aires, Argentina, 2001.

POTTER, W. G. Lotka's Law revisited. **Library Trends**, v. 31, p. 21-39, 1981.

RODRIGUES FILHO, O. S. **Características de aderência de revestimentos asfálticos aeroportuários: estudo de caso do Aeroporto Internacional de São Paulo/ Congonhas**. São Paulo: Dissertação: (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006.

RUNGRUANGVIROJN, P.; KANITPONG, K. Measurement of visibility loss due to splash and spray: porous, SMA and conventional asphalt pavements. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 11, p. 499-510, 2009.

SANTOS, E. de L. dos. **Análise histórica de medição de atrito das pistas do Aeroporto Santos Dumont - RJ**. São Paulo: Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação). Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São José dos Campos, 2004.

SAFARPOUR, H.; ZAVAREH, D. K.; MOHAMMADI, R. The common road safety approaches: A scoping review and thematic analysis. **Chinese Journal of Traumatology**, v. 23, p. 113-121, 2020.

SHIMENO, S.; TANAKA, T. **Evaluation and further development of porous asphalt pavement with 10 years' experience in Japanese expressways**. International Conference on Asphalt Pavement, Japan, 2010.

SILVA, K. C. R. **Aplicação do modelo de previsão de acidentes do HSM em rodovias de pista simples do Estado de São Paulo**. São Carlos: Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2011.



SILVA, M. N. Fatores de risco associados à severidade de atropelamentos em áreas urbanas: uma análise categórica temporal. Fortaleza: Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, 2021.

SILVA, A. M. **Atrito em Pistas Molhadas**. Diretoria de Engenharia da Aeronáutica. Rio de Janeiro, 1981.

SILVA, A. P. F.; NASCIMENTO, A. N.; PINHO, M. A. B.; FALK, J. **Estudo bibliométrico sobre custo em organizações da construção civil: contribuições do congresso brasileiro de custo de 1996 a 2010**. São Leopoldo: Congresso Brasileiro de Custos, 2012.

SILVA, J. P. S. **Aderência Pneu-pavimento em Revestimentos Asfálticos Aeroportuários**. Brasília: Dissertação (Mestrado). Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 2008.

TAKAHASHI, S. Comprehensive study on the porous asphalt effects on expressways in Japan: based on field data analysis in the last decade. **Road Materials and Pavement Design**, v. 14, p. 239-255, 2013.

TORRES, A. L. M. **Análise de Consistência de traçado de uma rodovia de Múltiplas Faixas**. São Paulo: Dissertação: (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2015.

TRETIN, L. C. **Análise Crítica de modelos de verificação de consistência de traçado**. São Paulo: Dissertação: (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2007.

VALE, A. C. **Estudo Laboratorial da Viabilidade do Uso de Fibras de Coco em Misturas Asfálticas do Tipo SMA**. Fortaleza: Dissertação (Mestrado). Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, 2007.

VANECK, N. J.; WALTMAN, L. **VOSviewer Manual**. CWTS Meaningful metrics, Universiteit Leiden, 2018.

VASCONCELOS, K. L. **Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas a Quente dosadas pelas metodologias Marshall e Superpave com diferentes granulometrias**. Fortaleza: Dissertação (Mestrado). Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, 2004.

WAMBOLD, J. C.; ANTLE, C. E.; HENRY, J. J.; RADO, Z. **International PIARC Experiment to Compare and Harmonize Texture and Skid Resistance Measurements**. PIARC World Road Association. Paris, France, 1995.

WAMBOLD, J. C; HENRY, J. J. Nasa Wallops Tire/Runway Friction: Workshops 1993-2002. **Transportation Research Board**, p. 155, 2002.

WANG, H.; WANG Z. Evaluation of pavement surface friction subject to various pavement preservation treatments. **Construction and Building Materials**, v. 48, p. 194-202, 2013.

WILSON, D. J. **The Effect of Rainfall and Contaminants on Road Pavement Skid Resistance**. New Zealand Transport Agency. Wellington, New Zealand, 2013.

WOOD E DONNELL. Causal inference framework for generalizable safety effect estimates. **Journal Accident Analysis and Prevention**, v. 104, p. 74-87, 2017.