



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

Leonardo Perim Guerson

**Método de Apoio à Definição de Soluções para Controle do Excesso de Peso em Veículos
Baseado no Processamento de Dados de Tecnologias HS-WIM**

Florianópolis
2021

Leonardo Perim Guerson

**Método de Apoio à Definição de Soluções para Controle do Excesso de Peso em Veículos
Baseado no Processamento de Dados de Tecnologias HS-WIM**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação
em Engenharia de Transportes e Gestão Territorial da
Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção
do título de Mestre em Engenharia de Transportes e
Gestão Territorial
Orientador: Prof. Amir Mattar Valente, Dr.
Coorientador: Prof. Valter Zanela Tani, Dr.

Florianópolis
2021

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática da
Biblioteca Universitária da UFSC

Guerson, Leonardo

Método de Apoio à Definição de Soluções para Controle do Excesso de Peso em Veículos Baseado no Processamento de Dados de Tecnologias HS-WIM / Leonardo Guerson ; orientador, Amir Mattar Valente , coorientador, Valter Zanela Tani, 2021.
142 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes e Gestão Territorial, Florianópolis, 2021.

Inclui referências.

1. Engenharia de Transportes e Gestão Territorial. I. Mattar Valente , Amir . II. Zanela Tani, Valter. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós Graduação em Engenharia de Transportes e Gestão Territorial. IV. Título.

Leonardo Perim Guerson

**Método de Apoio à Definição de Soluções para Controle do Excesso de Peso em Veículos
Baseado no Processamento de Dados de Tecnologias HS-WIM**

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

Prof. Jorge Destri Júnior, Dr.

Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Wellington Longuini Repette, Dr.

Universidade Federal de Santa Catarina

Silvana Croope, Dr.

Universidade do Alabama

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

Profª. Ana Maria Benciveni Franzoni, Dra.
Coordenação do Programa de Pós-Graduação

Prof. Amir Mattar Valente, Dr.
Orientador

Florianópolis, 2021

Este trabalho é dedicado aos meus maiores incentivadores: meus queridos pais e minha amada esposa.

AGRADECIMENTOS

À minha esposa, Ana Paula, por tanto carinho.

Aos meus pais, Carlos e Dayse, por sempre apoiarem as minhas empreitadas.

Às minhas irmãs, cunhados e sobrinhos, por estarem sempre de braços abertos.

Aos meus colegas de UFSC e de LabTrans, pela parceria diária.

Aos meus orientadores, Amir e Valter, pela confiança e aprendizado.

Ao DNIT, por ceder os dados HS-WIM utilizados nessa dissertação.

Aos cidadãos brasileiros, por financiarem, indiretamente, o desenvolvimento desta pesquisa.

Nós somos o presente mais incrível que podemos dar ao mundo. Em contrapartida, quando nos doamos e abrimos mão da nossa bagagem, vivemos cada momento como se fosse um presente. (LEVINE, 1979)

RESUMO

O presente trabalho visa apresentar, conceitualmente, um método para apoio à definição de soluções que visam à redução e o controle da prática de excesso de carga em veículos rodoviários, baseando-se no processamento de dados de sistemas de pesagem em movimento em alta velocidade, também referidos como *High-Speed Weigh-in-Motion* (HS-WIM). Para alcançar tal objetivo, o trabalho apresenta uma conceituação prática e teórica sobre sistemas HS-WIM e sobre estratégias utilizadas para redução e controle do excesso de peso em veículos rodoviários, além de uma revisão sistemática acerca do estado da arte mundial em aplicações de conceitos de mineração de dados para extração de conhecimentos a partir de bases de dados HS-WIM. Por fim, é detalhado cada processo do método desenvolvido e demonstrada a sua aplicabilidade, através do processamento de dados HS-WIM coletados de um sistema instalado em condições nacionais Brasileiras.

A sequência de processos que compõe o método proposto é inspirada em técnicas de resolução de problemas e de melhoria contínua de qualidade. Assim, o método é composto por cinco fases bem definidas, que facilitam a tomada de decisão na alocação de recursos para redução e controle do excesso de peso e permitem o acompanhamento e a melhoria das soluções implementadas ao longo do tempo. No mesmo contexto, o método é amplamente baseado em algoritmos de processamento dos dados HS-WIM, que utilizam conceitos de mineração de dados para prover uma caracterização objetiva da prática do excesso de peso no local onde os dados HS-WIM são coletados.

Palavras-chave: HS-WIM. WIM. Pesagem em Movimento em Alta Velocidade. Controle do Sobrepeso de Veículos. Mineração de Dados.

ABSTRACT

This work aims to present the concept of a method to support the definition of solutions for reducing and controlling the practice of vehicle overloading, based on the processing of High-Speed Weigh-in-Motion (HS-WIM) data. In order to achieve this goal, the work presents a practical and theoretical background on HS-WIM systems and on strategies used to reduce and control vehicle overloading, in addition to a systematic review about the state of the art in the application of data mining on the outputs of HS-WIM systems. Finally, each process of the developed method is detailed and its applicability is demonstrated with the processing of HS-WIM data collected from a system installed under national Brazilian conditions.

The sequence of processes that make up the proposed method is inspired by problem solving and continuous quality improvement techniques. Thus, the method is composed of five well-defined phases, which facilitate decision making in the allocation of resources for the reduction and control of vehicle overloads, as well as the monitoring and improvement of these solutions over time. Also, the method is largely based on HS-WIM data processing algorithms, which use data mining concepts to provide an objective characterization of the overloading practice on the site where the HS-WIM data is collected.

Keywords: HS-WIM. WIM. High-Speed Weigh-in-Motion. Vehicle Overload Control. Data Mining.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Problemática da pesquisa.....	18
Figura 2 – Métodos de fiscalização do peso de veículos.	22
Figura 3 – Postos de pesagem fixos operados pelo Departamento de Transportes da Flórida.....	23
Figura 4 – Inspeção de peso em baixa velocidade com balanças móveis na Suíça. ..	24
Figura 5 – HS-WIM para fiscalização direta na República Tcheca.	26
Figura 6 – Fiscalização de peso de veículos por documento fiscal.....	28
Figura 7 – Métodos para prevenção do excesso de peso de veículos.....	29
Figura 8 - Representação da medição das cargas dinâmicas por um sistema HS-WIM.	33
Figura 9 - Composição e saídas de um sistema WIM integrado a outras tecnologias ITS.	35
Figura 10 - Interface de operação remota HS-WIM.....	37
Figura 11- Instalação com sensores piezo-cerâmicos.	41
Figura 12 - Instalação com sensores piezo-quartzo.....	43
Figura 13- Instalação com sensores de pesagem em movimento em pontes.	44
Figura 14 - PPV de Rondonópolis/MT.....	49
Figura 15 - PPV com Pista Seletiva Convencional.	50
Figura 16 - PPV com Pista Seletiva HS-WIM.	50
Figura 17- UMO em operação com sistema LS-WIM móvel.	52
Figura 18 - Roteiro da revisão sistemática	56
Figura 19 – Análise comparativa da popularidade dos termos <i>Data Mining</i> e <i>Machine Learning</i> ao longo de 15 anos.....	57
Figura 20 – Análise das palavras-chave de maior frequência entre 1028 trabalhos de pesagem em movimento (Weigh-in-Motion) selecionados.....	59
Figura 21 – Segmentação de classes de veículos pesados em três grupos.....	69
Figura 22 – Simplificação dos grupos de tráfego padrão para classificação de segmentos.	72
Figura 23 – Produção de <i>clusters</i> de cargas do tráfego.	73
Figura 24 – Análise dos índices de velocidade em função do mês do ano.	75
Figura 25 – Histograma e distribuição do PBT por Mistura Gaussiana.....	77

Figura 26 – Padrão de tráfego classificado por hora do dia, em um ponto de coleta HS-WIM.....	79
Figura 27 – Estrutura de árvore de regressão para registros de veículos com excesso de peso.....	80
Figura 28 - Estrutura do método proposto.....	84
Figura 29 - Estrutura das representações gráficas dos processos do método.....	86
Figura 30 - Processo de identificação dos projetos de instalação HS-WIM.....	88
Figura 31 - Processo de caracterização da coleta de dados HS-WIM.....	89
Figura 32 – Processo de coleta e disponibilização de dados HS-WIM.....	91
Figura 33 – Subprocesso para cálculo dos excessos de peso.....	92
Figura 34 – Classificação dos registros de sobrepeso coletados pelo sistema HS-WIM.....	94
Figura 35 – Árvore de classificação de registros de excesso de peso.....	95
Figura 36 – Processo de formulação do desafio.....	98
Figura 37 – Processo de prospecção de recursos.....	99
Figura 38 – Processo para projeto de soluções.....	101
Figura 39 – Subprocesso para criação do plano preliminar de implantação.....	104
Figura 40 – Processo de avaliação e teste de aceitação.....	105
Figura 41 – Processo de implementação das soluções.....	107
Figura 42 – Processo de monitoramento do desempenho e ajustes.....	108
Figura 43 – PDCA na operação do método.....	109
Figura 44 – Leiaute do sistema HS-WIM.....	111
Figura 45 – Coleta de Dados HS-WIM em Araranguá/SC.....	113
Figura 46 – Registros de infração e sobrepeso acumulado no PBT, por mês de coleta (veículos com excesso no PBT, exclusivamente).....	117
Figura 47 – Registros de infração e sobrepeso acumulado nos eixos, por mês de coleta (veículos com excesso nos eixos, exclusivamente).....	118
Figura 48 – Registros de infração e sobrepeso acumulado no PBT e nos eixos, por mês de coleta (veículos com excesso no PBT e nos eixos, simultaneamente).....	118
Figura 49 – Registros de infração e sobrepeso acumulado no PBT, por dia da semana (veículos com excesso no PBT, exclusivamente).....	119
Figura 50 – Registros de infração e sobrepeso acumulado nos eixos, por dia da semana (veículos com excesso nos eixos, exclusivamente).....	120

Figura 51 – Registros de infração e sobrepeso acumulado no PBT e nos eixos, por dia da semana (veículos com excesso no PBT e nos eixos, simultaneamente).....	120
Figura 52 – Registros de infração e sobrepeso acumulado no PBT, por intervalo de hora do dia (veículos com excesso no PBT, exclusivamente).....	121
Figura 53 – Registros de infração e sobrepeso acumulado nos eixos, por intervalo de hora do dia (veículos com excesso nos eixos, exclusivamente).....	122
Figura 54 – Registros de infração e sobrepeso acumulado no PBT e nos eixos, por intervalo de hora do dia (veículos com excesso no PBT e nos eixos, simultaneamente).....	122
Figura 55 – Registros de infração e sobrepeso acumulado no PBT, por classe de veículo (veículos com excesso no PBT, exclusivamente).....	123
Figura 56 – Registros de infração e sobrepeso acumulado nos eixos, por classe de veículo (veículos com excesso nos eixos, exclusivamente).....	124
Figura 57 – Registros de infração e sobrepeso acumulado no PBT e nos eixos, por classe de veículo (veículos com excesso no PBT e nos eixos, simultaneamente).....	124
Figura 58 – Classificação de registros de excesso de peso no PBT, exclusivamente.	125
Figura 59 – Classificação de registros de excesso de peso nos eixos, exclusivamente.	126
Figura 60 – Classificação de registros de excesso de peso no PBT e nos eixos, simultaneamente.....	127
Figura 61 – Demonstração do mapa de soluções.....	131

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Comparação de diferentes tecnologias HS-WIM.....	46
Quadro 2 – Matriz para priorização dos recursos.....	65
Quadro 3 – Exemplo de classificação dos recursos.	102
Quadro 4 – Matriz para priorização dos recursos.....	103
Quadro 5 – Identificação dos projetos de instalação HS-WIM.....	111
Quadro 6 – Caracterização da coleta de dados HS-WIM.....	112
Quadro 7 – Distribuição dos registros de sobrepeso por tipo de enquadramento	115
Quadro 8 – Distribuição dos registros de sobrepeso por tipo de enquadramento	115
Quadro 9 – Demonstração do quadro de recursos.....	130
Quadro 10 – Demonstração da formulação do plano do soluções.	132

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANTT - Agência Nacional de Transportes Terrestres
ASTM - *American Society for Testing and Materials*
BPMN - *Business Process Model and Notation*
CCO - Centro de Controle Operacional
CPS - *Creative Problem Solving*
CSA - *Compliance, Safety Accountability*
CTB - Código de Trânsito Brasileiro
DETRAN - Departamento Estadual de Trânsito
DNER - Departamento Nacional de Estradas e Rodagem
DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
ESAL - *Equivalent Single Axle Load*
FHWA - *Federal Highway Administration*
HS-WIM - *High-Speed Weigh-in-Motion*
ISWIM - *International Society for Weigh-in-Motion*
ITS - *Intelligent Transportation Systems*
LabTrans - Laboratório de Transportes e Logística
LAP - Leitura Automática de Placas
LED - *Light-emitting Diode*
MEPDG - *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide*
PBT - Peso Bruto Total
PBTC - Peso Bruto Total Combinado
PDCA - *Plan, Do, Control, Act*
PMV - Painel de Mensagem Variável
PPV - Posto de Pesagem Veicular
PRF - Polícia Rodoviária Federal
QFV - Quadro de Fabricantes de Veículos
SQL - *Standard Query Language*
TCA - Transport Certification Australia
WIM - *Weigh-in-Motion*

LISTA DE SÍMBOLOS



Quantidade de registros de veículos com excesso de peso.



Excesso de peso, em toneladas, acumulado no Peso Bruto Total (PBT).



Excesso de peso acumulado nos eixos e grupos de eixos.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	OBJETIVOS	16
1.1.1	Objetivo Geral.....	16
1.1.2	Objetivos Específicos	16
1.2	JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA	17
1.3	PROCEDIMENTO METODOLÓGICO.....	18
1.4	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	19
2	CONCEITOS E REFERENCIAL TÉCNICO.....	21
2.1	MÉTODOS PARA REDUÇÃO E CONTROLE DO EXCESSO DE PESO DE VEÍCULOS	21
2.1.1	Fiscalização do peso de veículos	21
2.1.1.1	<i>Posto de pesagem fixo</i>	22
2.1.1.2	<i>Fiscalização móvel</i>	23
2.1.1.3	<i>HS-WIM para fiscalização direta.....</i>	25
2.1.1.4	<i>Verificação de documentos.....</i>	27
2.1.2	Métodos para prevenção ao excesso de peso	28
2.1.2.1	<i>Classificação de Transportadores</i>	29
2.1.2.2	<i>Controle de Acesso</i>	30
2.1.2.3	<i>Pedágio por Peso.....</i>	31
2.2	PESAGEM EM MOVIMENTO EM ALTA VELOCIDADE (HS-WIM).....	32
2.2.1	Composição e saídas de um sistema HS-WIM.....	35
2.2.2	Aplicações de HS-WIM para controle do excesso de peso.....	37
2.2.3	Tecnologias HS-WIM	39
2.2.3.1	<i>Sensores em linha</i>	40
2.2.3.2	<i>Balanças</i>	43
2.2.3.3	<i>Bridge WIM</i>	44
2.2.3.4	<i>Pesagem Embarcada</i>	45

2.3	CONTROLE DO EXCESSO DE PESO DE VEÍCULOS NO BRASIL	47
2.3.1	Tipificação do excesso de peso no Brasil.....	47
2.3.2	Limites de peso e tolerâncias	48
2.3.3	Classificação veicular e os limites de peso	48
2.3.4	Meios para controle do excesso de peso de veículos no Brasil.....	48
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SISTEMÁTICA	54
3.1	DEFINIÇÃO DO ROTEIRO DA REVISÃO SISTEMÁTICA	54
3.2	ETAPA 1 - IDENTIFICAR A NECESSIDADE DA REVISÃO.....	57
3.2.1	Análise bibliométrica da pesquisa em Pesagem em Movimento	58
3.3	ETAPA 2 - ELABORAR A PROPOSTA DA REVISÃO	61
3.4	ETAPA 3 - DESENVOLVER O PROTOCOLO DA REVISÃO	62
3.5	ETAPA 4 - IDENTIFICAR E SELECIONAR OS TRABALHOS.....	63
3.6	ETAPA 5 - AVALIAR OS TRABALHOS SELECIONADOS.....	63
3.7	ETAPA 6 - EXTRAIR DADOS E INFORMAÇÕES	63
3.8	ETAPA 7 - SINTETIZAR OS DADOS	64
3.9	ETAPA 8 – ELABORAR RELATÓRIO DO PROCESSO	67
3.9.1	Mineração de dados HS-WIM para projeto e avaliação de pontes.....	67
3.9.2	Mineração de dados HS-WIM para projeto e gerência de pavimentos.....	70
3.9.3	Mineração de dados HS-WIM em estudos de tráfego diversos.....	75
3.10	ETAPA 9 – APRESENTAR RESULTADOS E CONCLUSÕES	81
4	DESCRIÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO	84
4.1	DESCRIÇÃO DA FASE 1 – IDENTIFICAÇÃO DA REDE HS-WIM.....	87
4.1.1	Processo 1.1 - Identificação dos projetos de instalação HS-WIM	87
4.1.2	Processo 1.2 - Caracterização da coleta de dados HS-WIM.....	88
4.2	DESCRIÇÃO DA FASE 2 - INVESTIGAÇÃO DO EXCESSO DE PESO	90
4.2.1	Processo 2.1 – Coleta e disponibilização de dados HS-WIM	90
4.2.2	Processo 2.2 - Processamento de dados HS-WIM.....	93

4.3	DESCRIÇÃO DA FASE 3 - IDEALIZAÇÃO DE SOLUÇÕES.....	97
4.3.1	Processo 3.1 – Formulação do desafio.....	97
4.3.2	Processo 3.2 – Prospecção de recursos.....	99
4.4	DESCRIÇÃO DA FASE 4 - DEFINIÇÃO DE SOLUÇÕES PARA O EXCESSO DE PESO	100
4.4.1	Processo 4.1 – Projeto de soluções.....	101
4.4.2	Processo 4.2 - Avaliação e teste de aceitação	105
4.5	DESCRIÇÃO DA FASE 5 - IMPLANTAÇÃO E CONTROLE DO DESEMPENHO	106
4.5.1	Processo 5.1 - Implementação das soluções.....	107
4.5.2	Processo 5.2 - Monitoramento do desempenho e ajustes	108
5	DEMONSTRAÇÃO DA APLICABILIDADE DO MÉTODO PROPOSTO	110
5.1	DEMONSTRAÇÃO DA FASE 1 – IDENTIFICAÇÃO DA REDE HS-WIM ..	110
5.2	DEMONSTRAÇÃO DA FASE 2 - INVESTIGAÇÃO DO EXCESSO DE PESO	113
5.2.1	Análise preliminar dos índices de excesso de peso registrados.....	116
5.2.1.1	<i>Análise do sobrepeso veicular por mês de coleta de dados</i>	<i>117</i>
5.2.1.2	<i>Análise do sobrepeso veicular por dia da semana</i>	<i>119</i>
5.2.1.3	<i>Análise do sobrepeso veicular por intervalo de hora do dia.....</i>	<i>121</i>
5.2.1.4	<i>Análise do sobrepeso veicular por classe de veículo pesado</i>	<i>123</i>
5.2.2	Classificação dos registros de excesso de peso	125
5.3	DEMONSTRAÇÃO DA FASE 3 - IDEALIZAÇÃO DE SOLUÇÕES PARA O EXCESSO DE PESO	128
5.4	DEMONSTRAÇÃO DA FASE 4 - DEFINIÇÃO DE SOLUÇÕES PARA O EXCESSO DE PESO	132
6	CONCLUSÃO.....	134
6.1	RECOMENDAÇÕES E SUGESTÕES PARA NOVAS PESQUISAS.....	136
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	137

1 INTRODUÇÃO

A prática de sobrepeso em veículos rodoviários é um problema comum a diversos países e tende a comprometer as boas condições de trafegabilidade, a segurança dos usuários e a concorrência leal de transportadores e de embarcadores (DE CEUSTER et al., 2008; JACOB; COTTINEAU, 2016; JACOB; FEYPELL-DE LA BEAUMELLE, 2010; TURNER; NICHOLSON, 2009). Essa situação desafia as organizações responsáveis pela gestão de rodovias e intensifica a necessidade de se desenvolver métodos mais efetivos para controle da prática do sobrepeso em veículos. Dentro da conjuntura descrita, o presente trabalho busca trazer respostas sobre como utilizar dados de pesagem em movimento em alta velocidade, *High-Speed Weigh-in-Motion* (HS-WIM), para aprimorar a aplicação de recursos voltados à redução e ao controle do excesso de peso de veículos, através de um método de apoio à definição de soluções para controle do excesso de peso em veículos baseado no processamento de dados de tecnologias HS-WIM.

As soluções mais comuns, aplicadas por governos e autoridades rodoviárias para redução e controle do excesso de peso de veículos, envolvem a inspeção e a fiscalização dos limites de peso, através de postos de pesagem fixos e móveis, geralmente situados às margens das rodovias. Alternativamente, outras ações já implementadas mundialmente visam à prevenção como estratégia de controle do excesso de peso, de forma complementar aos processos de fiscalização existentes.

Nos dias atuais, a alocação de recursos para redução e controle do excesso de peso, seja no campo da fiscalização ou da prevenção, pode ser apoiada por métodos inteligentes que se baseiam em dados e informações sobre a real situação das rodovias. É neste contexto que se inserem as tecnologias de pesagem em movimento em alta velocidade, também conhecidas como *High-Speed Weigh-in-Motion* (HS-WIM), que permitem a caracterização da carga e dos respectivos excessos de peso que trafegam sobre as rodovias, através de uma coleta de dados confiável e ininterrupta.

Considerando a conjuntura apresentada, o presente trabalho visa a elaboração de um método que, a partir da gestão de dados e informações oriundas de sistemas HS-WIM, auxilia os processos de definição e de alocação de soluções para o controle do excesso de peso em rodovias. As soluções a serem definidas com intermédio do método variam em função das necessidades do local onde serão implementadas.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Essa pesquisa tem como objetivo geral o desenvolvimento de um método de apoio à tomada de decisão e de melhoria contínua na aplicação de soluções destinadas ao controle do excesso de peso em veículos rodoviários, com base no processamento de dados de tráfego e de carga coletados por sistemas de pesagem em movimento em alta velocidade (HS-WIM).

1.1.2 Objetivos Específicos

Com o intuito de alcançar o objetivo geral estabelecido para a pesquisa, os seguintes objetivos específicos são estabelecidos:

- Identificar as características e funcionalidades de sistemas de pesagem em movimento em alta velocidade, do inglês *High-Speed Weigh-in-Motion* (HS-WIM) e as suas aplicações até hoje implantadas para estratégias de controle do excesso de peso de veículos em rodovias.
- Identificar as principais alternativas para controle do excesso de peso de veículos em rodovias até hoje implementadas, tanto no campo da fiscalização rodoviária, quanto nas áreas relacionadas à prevenção do excesso de peso.
- Compreender como o controle do excesso de peso de veículos é realizado em rodovias brasileiras.
- Compreender como se caracteriza o estado da arte mundial em aplicações de conceitos de mineração de dados sobre saídas de sistemas HS-WIM, evidenciando a base teórica sobre a qual o trabalho busca trazer uma contribuição.
- Definir um método que viabilize a utilização sistemática de dados de tecnologias HS-WIM para apoio à definição de estratégias de redução e controle do excesso de peso praticado por veículos em rodovias.
- Demonstrar a aplicabilidade do método desenvolvido, com base no processamento de dados HS-WIM coletados de um sistema instalado em condições nacionais Brasileiras.

1.2 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA

O controle do excesso de peso de veículos se torna mais complexo com o aumento da frota de veículos pesados e rotas de tráfego, principalmente quando os recursos disponíveis para essa função não acompanham, proporcionalmente, tal crescimento. No mesmo contexto, ainda é possível que os recursos empregados para redução e controle do excesso de peso em rodovias, além de escassos, não sejam empregados de forma efetiva e propriamente direcionada. Considerando a conjuntura apresentada, o presente trabalho é especialmente relevante pois busca promover a inteligência e a efetividade da alocação de recursos para controle do excesso de peso em rodovias, baseando-se no processamento de dados coletados continuamente por sistemas de pesagem em movimento em alta velocidade (HS-WIM).

Veículos com sobrepeso contribuem com deterioração precoce do pavimento de rodovias e pontes. Assim, a redução dos índices de veículos que trafegam com excesso de peso sobre a via significa diretamente uma melhor proteção dessa infraestrutura (JACOB; FEYPELL-DE LA BEAUMELLE, 2010).

Outro fator que deve ser levado em consideração é a segurança das vias. Veículos com excesso de peso possuem maiores distâncias de frenagem e menores tempos de reação. Muitas das rodovias também não foram projetadas para a circulação de veículos nessas condições, tornando o tráfego de veículos com sobrepeso ainda mais perigoso (DE CEUSTER et al., 2008; TURNER; NICHOLSON, 2009).

A promoção da competição justa é também um fator de relevância. O primeiro é a competição entre modais. Com a prática do sobrepeso, as companhias que transportam em conformidade com a lei têm dificuldade de competir com os transportadores que praticam o sobrepeso, o que as obriga a adotarem práticas similares às companhias infratoras para permanecerem competitivas (JACOB; COTTINEAU, 2016)

A utilização de dados e de inteligência para os processos voltados à redução e ao controle do excesso de peso é importante para que esses processos sejam propriamente projetados e direcionados. Nesse sentido, a partir do processamento adequado de dados HS-WIM, é possível conhecer, com elevado nível de detalhe, o problema com o qual se está lidando, para que se possa reagir de acordo com as características desse problema e com o patamar qualidade desejado.

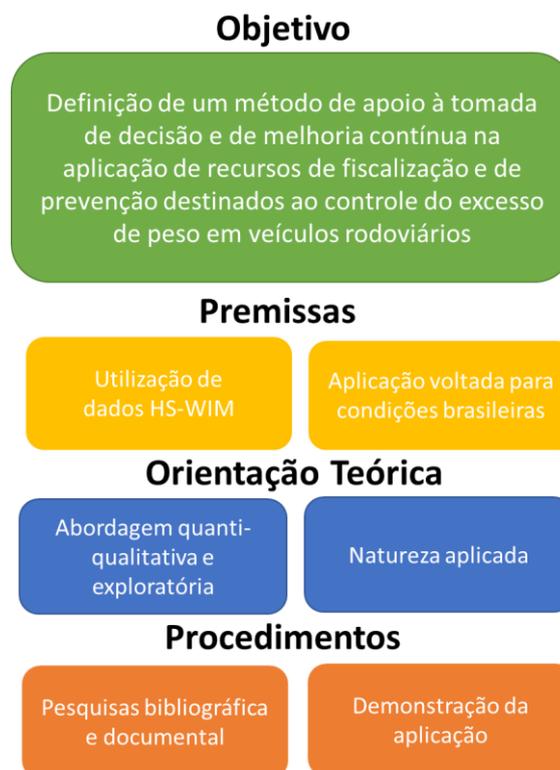
No escopo deste trabalho, o desenvolvimento de um método para apoio à tomada de decisão na definição de soluções para redução e controle do sobrepeso visa tornar mais precisa

e efetiva a alocação de recursos voltados para essa função. Neste contexto, a utilização de dados de sistemas HS-WIM possibilita a obtenção de ganhos em quantidade e em qualidade de informações levantadas sobre os veículos que trafegam nas rodovias, viabilizando uma melhor caracterização do problema do excesso de peso e subsidiando a elaboração de ações especificamente direcionadas às características do sobrepeso registrado.

1.3 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

A abordagem teórica (problemática) adotada para tratar da presente pesquisa é ilustrada na Figura 1, a partir de uma breve redefinição do objetivo do trabalho.

Figura 1 - Problemática da pesquisa.



Fonte: Autor (2021)

Conforme mostra a Figura 2, a partir do objetivo tratado, a trabalho possui duas premissas básicas, sendo essas:

- A utilização de sistemas HS-WIM como base para do desenvolvimento do método, através dos quais o excesso de peso local poderá ser caracterizado com base em uma coleta de dados contínua.

- A aplicação do método voltada para as condições Brasileiras, tanto em termos de características da frota de veículos, quanto em relação aos regulamentos que incidem sobre ocorrência dos excessos de peso e os respectivos meios de redução e controle dessa situação.

Em relação à sua orientação teórica, trata-se de uma pesquisa quanti-qualitativa e exploratória. Os aspectos qualitativos do trabalho tratam da aplicação de métodos para resolução de problemas e para melhoria contínua de qualidade de processos, enquanto os aspectos quantitativos se referem à aplicação de variáveis numéricas para teste das técnicas desenvolvidas para caracterização do excesso de peso no escopo do método proposto. Ainda, a pesquisa é exploratória, pois busca o aprofundamento da compreensão de métodos existentes, analisando suas respectivas aplicabilidades para o propósito idealizado no trabalho. Por fim, verifica-se que a pesquisa possui natureza aplicada, pois busca a obtenção de conhecimentos para aplicação prática, direcionados ao aprimoramento da abordagem de um problema específico e imediato: o excesso de peso de veículos.

Quanto aos procedimentos adotados, são utilizadas pesquisas bibliográfica e documental para a composição de uma base prática e teórica sobre sistemas HS-WIM e estratégias utilizadas para redução e controle do excesso de peso em veículos rodoviários. Por fim, uma demonstração da aplicação é realizada para o contexto rodoviário brasileiro, culminando na definição de um método de apoio à definição e ao direcionamento de ações para redução e controle do excesso de peso de veículos em condições nacionais brasileiras, considerando a utilização de sistemas de pesagem em movimento em alta velocidade (HS-WIM).

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho foi estruturado com o intuito de, primeiramente, contextualizar as necessidades e desafios inerentes ao controle do excesso de peso em veículos rodoviários, assim como a abordagem teórica adotada para contribuir com a solução do problema descrito. Na sequência, a partir do referencial teórico, expõe-se o conceito de pesagem em movimento em alta velocidade, do inglês *High-Speed Weigh-in-Motion* (HS-WIM), como ferramenta com elevado potencial de atuação em estratégias de controle do excesso de peso em rodovias, além de aspectos referentes ao controle do excesso de peso em veículos pesados. Ainda, realiza-se uma pesquisa bibliográfica sistemática sobre mineração de dados aplicada à pesagem em

movimento. Por fim, a dissertação aborda o desenvolvimento e aplicação de um método, através do qual se realiza a definição e o direcionamento de ações de controle do excesso de peso em veículos rodoviários com base na utilização de dados de tecnologias HS-WIM.

Considerando o contexto apresentado, o trabalho é estruturado conforme itens que seguem:

- **Conceitos e Referencial Técnico:** Exposição dos conceitos e definições relevantes para o trabalho, através de uma narrativa que aborda o controle do excesso de peso de veículos, a pesagem em movimento e a tipificação do excesso de peso em rodovias do Brasil.
- **Revisão Bibliográfica Sistemática:** Descrição do processo e apresentação dos resultados de uma revisão bibliográfica sistemática acerca do estado da arte mundial em aplicações de conceitos de mineração de dados sobre as saídas de sistemas HS-WIM, que evidencia a base teórica sobre a qual o trabalho traz uma contribuição.
- **Descrição do Método Proposto:** Descrição detalhada do método proposto para apoio à definição de ações de controle do excesso de peso em rodovias, inspirado em modelos existentes no campo da resolução de problemas e melhoria contínua de processos e tomando como base a caracterização do excesso de peso a partir do processamento de dados de sistemas HS-WIM.
- **Demonstração da Aplicabilidade do Método Proposto:** Demonstração da aplicação do método proposto, com base no processamento de dados de um sistema HS-WIM implantado em condições brasileiras.
- **Conclusão:** Apresentação das conclusões da pesquisa e as perspectivas sobre o tema pesquisado para trabalhos futuros.

2 CONCEITOS E REFERENCIAL TÉCNICO

Este capítulo apresenta, inicialmente, os principais meios para controle do excesso de peso de veículos até hoje documentados e difundidos mundialmente. Na sequência, é realizada uma abordagem sobre as definições e conceitos em torno das tecnologias de pesagem em movimento, com viés mais específico para tecnologias e aplicações de alta velocidade. Em seguida são tratadas questões relacionadas ao controle do excesso de peso em veículos de carga e passageiros que trafegam em rodovias brasileiras, compondo uma base prática e teórica para melhor contextualização dos leitores do trabalho.

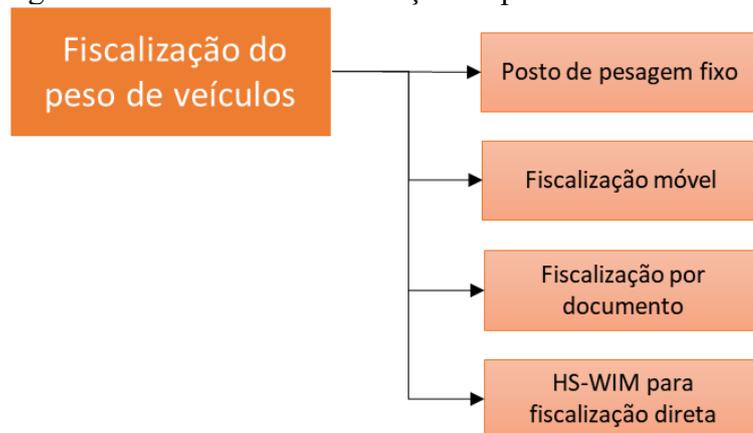
2.1 MÉTODOS PARA REDUÇÃO E CONTROLE DO EXCESSO DE PESO DE VEÍCULOS

Os métodos mais tradicionais para controle do excesso de peso e incentivo à conformidade com os limites de carga de veículos envolvem a fiscalização dos limites de peso. Apesar da predominância da fiscalização como principal método para redução e controle do excesso de peso de veículos, outras alternativas já foram empregadas ao redor do mundo visando o aumento da conformidade com os limites de peso de veículos. Considerando essa conjuntura, neste capítulo são descritos, de forma resumida, os principais métodos até hoje documentados, que visam à redução e o controle do excesso de peso em veículos.

2.1.1 Fiscalização do peso de veículos

Nos processos de fiscalização do peso de veículos, agentes do estado ou organizações responsáveis pelo controle do excesso de peso em rodovias podem impor sanções a transportadores, embarcadores, condutores ou proprietários de veículos que, dependendo da legislação de cada local, são considerados responsáveis pelo cumprimento dos limites máximos de Peso Bruto Total (PBT) e de peso por eixo/grupo de eixos de veículos. Os meios mais comuns de fiscalização dos limites de peso são postos de fixos de pesagem e unidades de fiscalização móvel. Além desses meios, a fiscalização dos limites de peso pode ser feita por meio da verificação de documentos, que porventura contenham a informação do peso declarado da carga transportada. As abordagens para fiscalização do peso de veículos podem ser divididas em quatro tipos principais, conforme mostra a Figura 2.

Figura 2 – Métodos de fiscalização do peso de veículos.



Fonte: Autor (2021)

Cada um dos quatro tipos de soluções para fiscalização dos limites de peso, mostradas na Figura 2 são tratadas em maior nível de detalhe nas subseções a seguir.

2.1.1.1 *Posto de pesagem fixo*

Os postos de pesagem fixos são estruturas físicas, geralmente localizadas às margens das rodovias, onde os veículos pesados são requisitados a entrar para a inspeção do seu Peso Bruto Total (PBT) e do peso exercido por seus eixos e grupos de eixos. Para isso, utilizam-se sistemas de pesagem estática ou de operação em baixa velocidade, a depender da legislação de cada local. A fiscalização através de postos fixos de pesagem é um dos métodos mais comuns para controle do excesso de peso, e tem sua operação amplamente documentada em países como Estados Unidos (USDOT, 2000) e Brasil (LABTRANS; ANTT, 2018). Neste contexto, a Figura 3 mostra a imagem aérea de dois postos de pesagem fixos no estado da Florida, Estados Unidos.

Figura 3 – Postos de pesagem fixos operados pelo Departamento de Transportes da Flórida.



Fonte: FDOT (2020)

Dentre as principais vantagens de um posto de pesagem fixo, destaca-se a possibilidade de implantação de um local com infraestrutura administrativa de apoio à equipe de fiscalização e a existência, muitas vezes, de um espaço para transbordo e/ou remanejamento das cargas excedentes, para quando esse tipo de medida administrativa for necessário. As desvantagens incluem a pouca ou nenhuma flexibilidade deste modo de fiscalização em relação à sua alocação, sendo frequentemente alvo de rotas de fuga de condutores que buscam evitar, propositalmente, as inspeções (FRANCESCHI et al., 2019).

2.1.1.2 *Fiscalização móvel*

A fiscalização dos limites de peso também pode ser realizada por meio unidades móveis de fiscalização. Nesse tipo de solução, são utilizadas balanças portáteis que realizam a pesagem de veículos por eixo ou por roda, de forma estática ou em baixa velocidade. Essas balanças são transportadas por agentes de fiscalização em veículos oficiais e são operadas em locais variados às margens das rodovias. Assim como os postos de pesagem fixos, a fiscalização móvel é amplamente utilizada em todo mundo para controle do excesso de peso de veículos. Nesta conjuntura, a Figura 4 mostra uma operação de fiscalização móvel realizada na Suíça (WORLD HIGHWAYS, 2013).

Figura 4 – Inspeção de peso em baixa velocidade com balanças móveis na Suíça.



Fonte: World Highways (2013)

Na Figura 4, a fiscalização é realizada com uma balança móvel de baixa velocidade, quando o veículo é pesado em movimento, geralmente em velocidades de até 12 km/h. Quando utilizadas para fins fiscalização, as balanças móveis são operadas sobre uma superfície plana e em alguns casos, podem ser utilizadas acopladas a esteiras niveladoras para melhor confiabilidade da medição. Ainda, as balanças utilizadas em postos de pesagem móveis podem ser do tipo “estática”, quando a pesagem é realizada com o veículo parado. A escolha do tipo de balança para a fiscalização móvel geralmente ocorre em função da legislação de cada local.

A principal vantagem relacionada à fiscalização móvel está na flexibilidade de alocação dos pontos de fiscalização. Quando a fiscalização é baseada em balanças móveis, os locais de inspeção podem variar de acordo com as demandas específicas da área monitorada.

Por outro lado, as desvantagens deste tipo de equipamento estão relacionadas ao tempo relativamente elevado dos processos de inspeção e da provável indisponibilidade de infraestrutura de estacionamento para retenção de veículos e medidas administrativas envolvendo transbordo e/ou remanejamento das cargas excedentes.

2.1.1.3 HS-WIM para fiscalização direta

O termo “HS-WIM para fiscalização direta” se refere à utilização de sistemas de pesagem em movimento em alta velocidade, do inglês *High-Speed Weigh-in-Motion* (HS-WIM), instalados na pista de rolamento das rodovias, como único instrumento de inspeção e fiscalização dos limites de peso de veículos em alta velocidade (ou à velocidade diretriz das vias). Neste tipo de contexto, o processo desde o registro da infração até a aplicação de sanções aos infratores pode ser completamente automatizado, tornando-se similar aos processos eletrônicos de fiscalização dos limites de velocidade, também conhecidos como radares de velocidade. Até hoje, a implementação de HS-WIM para fiscalização direta foi realizada em poucos países, sendo esses: Taiwan, República Tcheca e na Hungria.

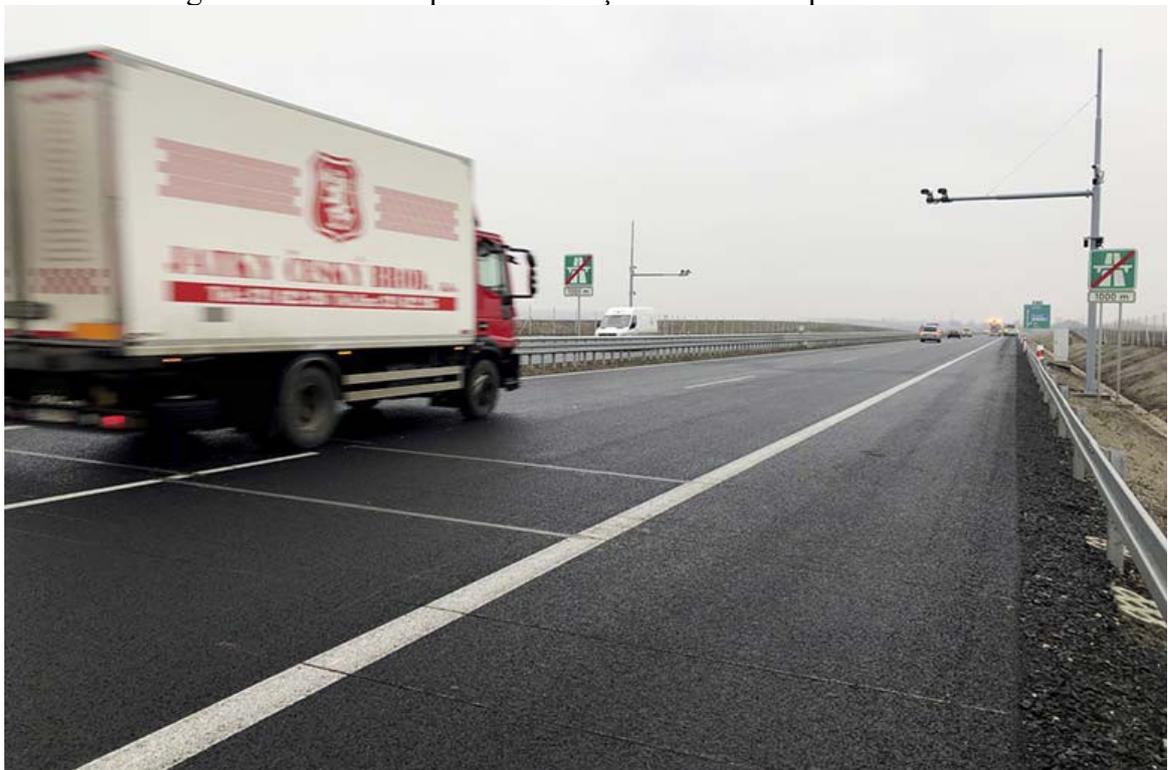
Em 1998, Taiwan se tornou o primeiro país do mundo a ter uma experiência com o uso de sistemas HS-WIM para fiscalização direta. Nesse caso, essa modalidade de fiscalização foi implementada em uma única rodovia, onde havia índices elevados de excesso de peso. Já os erros máximos admissíveis eram de $\pm 15\%$ para PBT e $\pm 30\%$ para eixos e grupos de eixos, respectivamente, e as tolerâncias aplicadas eram proporcionais aos erros máximos admissíveis (JACOB; COTTINEAU, 2016).

Os sistemas HS-WIM utilizados para fiscalização direta em Taiwan podem ser considerados de baixo desempenho para os padrões atuais, mas tiveram um papel importante na redução dos graves índices de excesso de peso da rodovia em que foram implantados em Taiwan. Nessa operação, após passagem pelos sistemas HS-WIM, o excesso de peso era informado ao condutor, que poderia optar por uma segunda pesagem em baixa velocidade caso não concordasse com o resultado do sistema HS-WIM. Por fim, após 2 anos de operação, o excesso de peso local foi reduzido e os sistemas HS-WIM foram descontinuados.

Em 2011, a República Tcheca foi o primeiro país do mundo a regulamentar o uso de sistemas HS-WIM para fiscalização direta e implantar de forma definitiva essa modalidade de fiscalização (DOUPAL et al., 2016). Nesse país, foi introduzido o conceito de “Validação das Medições”, no qual os sistemas de pesagem em movimento devem controlar as diferentes

variáveis que influenciam sobre a qualidade pontual das medições em alta velocidade e indicar quais medições possuem maior possibilidade de apresentarem acurácia inferior aos erros máximos admissíveis estabelecidos. Critérios para invalidação das medições incluem a variação da carga dinâmica dos veículos e a posição das passadas sobre os sensores. Assim, uma parcela das medições pode ser descartada para que não haja equívocos na aplicação das penalidades. A Figura 5 mostra um sistema HS-WIM para fiscalização direta em operação na República Tcheca.

Figura 5 – HS-WIM para fiscalização direta na República Tcheca.



Fonte: World Highways (2018)

Após sua introdução na República Tcheca, o conceito de Validação das Medições passou a ser estudado em diferentes países do mundo, compondo a regulamentação de sistemas HS-WIM para fiscalização direta na Hungria. Nesse contexto, nos processos de homologação e de operação, os sistemas HS-WIM podem invalidar, automaticamente, as medições com chances de apresentarem risco de erros maiores do que os percentuais admissíveis.

A partir de 2018, iniciou-se a implementação de sistemas HS-WIM para fiscalização direta na Hungria. Em 2019, segundo trabalho de Ronay-Tobel et al. (2019), o país já contava com 107 sistemas HS-WIM implantados e 274 faixas monitoradas, compondo a maior rede de sistemas HS-WIM para fiscalização direta do mundo. Segundo Ronay-Tobel et al. (2019), a

implantação da extensa rede de sistemas HS-WIM da Hungria foi economicamente viável por conta alocação dos pontos de coleta em locais próximos a praças de pedágio, que já contavam com grande parte da infraestrutura necessária para instalação e operação dos sistemas HS-WIM.

Na experiência Húngara de implementação de sistemas HS-WIM para fiscalização direta, foram estabelecidas três classes de desempenho distintas para homologação dos sistemas de pesagem, nas quais as tolerâncias para imposições de penalizações por excesso de peso são compatíveis com os erros máximos admissíveis de cada classe, conforme listado abaixo:

- $\pm 5\%$ para PBT e $\pm 8\%$ para eixos e grupos de eixos.
- $\pm 7\%$ para PBT e $\pm 10\%$ para eixos e grupos de eixos.
- $\pm 10\%$ para PBT e $\pm 15\%$ para eixos e grupos de eixos.

A classe mais rígida de erros máximos admissíveis estabelecida na Hungria é compatível com a classe mais branda estabelecida pelo Portaria do INMETRO nº 367, de 03 de dezembro de 2020, que aprova o Regulamento Técnico Metrológico (RTM) sobre instrumentos de pesagem automáticos de veículos rodoviários em movimento. Por estabelecer requisitos objetivos e passíveis de serem testados para qualquer tipo de velocidade de operação, esse regulamento pode viabilizar a futura implementação de sistemas HS-WIM para fiscalização direta no Brasil.

2.1.1.4 Verificação de documentos

Além da utilização de sistemas de pesagem, a fiscalização dos limites de peso pode ser realizada através da verificação de documentos que contenham a declaração do peso da carga transportada. Neste tipo de fiscalização, geralmente realizada com documentos fiscais, o peso da carga é somado com a tara do veículo e o valor total é comparado com o limite regulamentado. Um exemplo de fiscalização dos limites de peso por meio da verificação de documentos ocorre no Brasil, sendo frequentemente realizado pela Polícia Rodoviária Federal. A Figura 6 um procedimento de fiscalização de peso por documento fiscal desempenhado no Brasil.

Figura 6 – Fiscalização de peso de veículos por documento fiscal.



Fonte: Na Estrada RO (2020)

A fiscalização do cumprimento dos limites de peso de veículos pode ser considerado o método mais tradicional de coibição do excesso de peso nas rodovias. Em todo o mundo, esse tipo de solução tem se modernizado e a sua aplicação tem se tornado mais diversificada entre as organizações responsáveis.

Segundo Otto (2018), o custo de implantação e operação de um sistema HS-WIM é cerca de 10 vezes menor que o de um posto de pesagem fixo tradicional. Nesse sentido, a migração gradual dos métodos de fiscalização para soluções baseadas em HS-WIM tende a tornar mais abrangente o nível de controle do excesso de peso, uma vez que mais pontos de coleta podem ser implantados com os mesmos recursos.

Por fim, cabe destacar que a fiscalização de peso pode ser complementada por ações de prevenção, que envolvem a adoção de medidas antecipadas ao flagrante da prática do excesso de peso, geralmente direcionadas a segmentos da indústria de transportes ou áreas geográficas com maiores índices de ou probabilidade de irregularidades. Esse tipo de abordagem alternativa à fiscalização é tratado na próxima seção do trabalho.

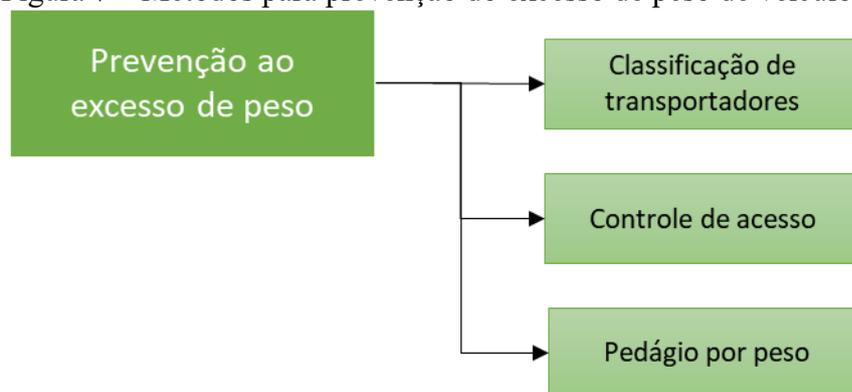
2.1.2 Métodos para prevenção ao excesso de peso

O controle do excesso de peso de veículos pode ser realizado por meio de medidas alternativas e/ou complementares aos tradicionais processos de fiscalização, incentivando a autorregulação da indústria com influência sobre o excesso de peso no transporte rodoviário. Recentemente, devido ao desenvolvimento da indústria de dispositivos de Sistemas Inteligentes

de Transportes, *Intelligent Transportation Systems* (ITS), inclusive a melhoria significativa na precisão e na acurácia de sistemas de pesagem em movimento, as soluções para controle do excesso de peso passaram a incorporar informações de qualidade e inteligência, o que permitiu o surgimento de iniciativas que promovem a prevenção ao excesso de peso a partir de uma maior transparência na relação entre o Estado e a indústria e de ações de controle especificamente voltadas aos atores que praticam o sobrepeso de forma mais frequente e severa.

Os métodos para prevenção ao excesso de peso de veículos implementados por diferentes países tendem a ser heterogêneos entre si, pois frequentemente envolvem abordagens não tradicionais e possuem elementos que ainda não foram replicados mundialmente. Para fins de conceituação desse tipo de solução para controle do excesso de peso, foram identificados três tipos de solução, conforme mostra a Figura 7.

Figura 7 – Métodos para prevenção do excesso de peso de veículos.



Fonte: Autor (2021)

Cada um dos três tipos de soluções listadas para prevenção do excesso de peso, alternativas à fiscalização rodoviária, são tratadas em detalhe nas subseções a seguir.

2.1.2.1 *Classificação de Transportadores*

A Classificação de Transportadores como meio de redução e controle da prática do excesso de peso de veículos consiste na identificação de diferentes perfis entre companhias transportadoras, com base nos seus índices de irregularidades de trânsito e/ou de transporte. Assim, uma vez identificados os transportadores cujas irregularidades são mais frequentes e/ou severas, o desenvolvimento de ações visando à promoção da conformidade pode ser melhor direcionado. Exemplos práticos e com abordagens distintas de aplicação da Classificação de

Transportadores para apoio à redução e ao controle do excesso de peso ocorrem na Holanda e nos Estados Unidos.

No programa holandês *Company Profiling*, todos os veículos que passam sobre a rede de sistemas HS-WIM e que são identificados com potencial excesso de peso têm seus dados coletados e armazenados em um banco de dados. Após três meses de coleta, as infrações por excesso de peso são agrupadas por companhia transportadora, e essas empresas são classificadas em função do potencial dano total causado ao pavimento durante o período de coleta de dados. A partir dessa classificação, é formada uma lista de empresas com a maior severidade em infrações por excesso de peso, as quais, por sua vez, são avisadas de que podem ser condenadas a pagar pelo dano causado ao pavimento, caso não melhorem seu desempenho em relação ao sobrepeso praticado (VAN LOO, 2015).

Por sua vez, nos Estados Unidos, o programa *Compliance, Safety, Accountability* (CSA) utiliza dados de fiscalização rodoviária e de acidentes para o cálculo de um índice de segurança para cada transportador e, com base nesse índice, realiza-se a priorização das inspeções em postos fixos de pesagem. Assim, diferentes programas de credenciamento eletrônico utilizam esse índice de segurança, denominado *Safety Measuring System* (SMS), como critério para determinar quais veículos devem adentrar os postos de fiscalização. Portanto, por meio desse benefício aos transportadores com comprovado nível de conformidade e segurança, o programa CSA promove a prevenção do excesso de peso de veículos que desejam manter esse benefício (FMCSA, 2020).

A Classificação de Transportadores pode ser uma estratégia efetiva para o desenvolvimento de ações complementares aos tradicionais processos de fiscalização rodoviária. Com essa abordagem, torna-se possível direcionar os recursos voltados para o controle do excesso de peso para os segmentos específicos em que o sobrepeso de veículos ocorre de forma mais frequente e severa, permitindo a racionalização desses recursos.

2.1.2.2 *Controle de Acesso*

Os programas de Controle de Acesso também podem ser utilizados como estratégias para redução e controle da prática do excesso de peso. Esse tipo de programa aplicado a redes de transporte rodoviário se propõe a monitorar os veículos excepcionalmente autorizados a transitar em determinados trechos da malha rodoviária existente, mediante atendimento de critérios pré-estabelecidos, como por exemplo, compartilhar informações confiáveis a respeito

do peso do veículo. Um exemplo de ação de controle de acesso que contribui para o controle do excesso de peso de veículos é conduzido na Austrália, onde veículos mais longos e pesados são equipados com dispositivos de rastreamento e de pesagem embarcada como condição de acesso à rede viária (MA et al., 2009; KARL et al., 2010; COLEMAN et al., 2012).

Na Austrália, o programa IAP, do inglês *Intelligent Access Program*, promove o acesso de veículos considerados de alta capacidade, ou seja, veículos mais longos e pesados, a determinados trechos da malha rodoviária, contanto que realizem a instalação de um conjunto de dispositivos embarcados que permitem o monitoramento dos horários e locais percorridos e do peso praticado. O programa IAP possibilita que os gestores de rodovias acessem informações dos veículos instrumentados, como:

- Registros de posicionamento.
- Registros de velocidade.
- Informações de transporte declaradas.
- Registros de peso do veículo por instrumentação embarcada.

Para a instrumentação dos veículos participantes do programa, diferentes empresas fabricantes de tecnologias são certificadas por uma entidade do governo australiano denominada *Transport Certification Australia* (TCA). O custo para implantação das tecnologias é negociado diretamente entre os usuários e as empresas certificadas, não havendo taxas adicionais para participação no IAP.

O monitoramento realizado por meio do IAP assegura que os veículos que aderiram ao programa estão respeitando as condições de acesso impostas sobre as rodovias, ou seja, estão aderindo às rotas aprovadas, nas condições de tráfego e de transporte permitidas, incluindo os limites de peso. Por meio de estratégias como a do programa IAP, torna-se possível promover os níveis de controle e conformidade entre os veículos com maior potencial de dano à segurança e à infraestrutura de transporte viário, através de uma abordagem alternativa à fiscalização tradicional.

2.1.2.3 Pedágio por Peso

A cobrança de pedágio por peso também pode ser usada como estratégia para prevenção e controle do excesso de peso em rodovias. Nesse tipo de contexto, as autoridades rodoviárias podem impor uma cobrança adicional pelo acesso de veículos com sobrepeso à

rodovia, proporcional ao potencial dano causado por essa parcela de excesso de peso sobre o trecho a ser trafegado. No mesmo sentido, os veículos podem ter a sua tarifa de pedágio cobrada de acordo com a quantidade de peso carregada. As experiências com pedágio por peso como solução para controle do excesso de peso em rodovias se tornaram notáveis, recentemente, na China, onde este tipo de estratégia foi implementada em cerca de 90% das rodovias do país (HANG et al., 2013; HUANG et al., 2019)

Em agosto de 2016, as autoridades rodoviárias Chinesas iniciaram a implementação de uma nova política de cobrança de pedágio para veículos pesados, com o objetivo de reduzir os índices de excesso de peso praticado nas rodovias do país. Nessa nova abordagem, as taxas de pedágio sobre veículos pesados deixaram de ser cobradas em função do tipo (ou classe) do veículo e passaram a ser calculadas de forma proporcional ao peso da carga transportada. Ainda, quando os veículos são detectados com excesso de peso, um valor por peso maior passa a ser cobrado.

De acordo com o trabalho de Huang et al., (2019), a introdução da política de pedágio por peso contribuiu para a redução dos índices de excesso de peso no país. Com base na coleta contínua de sistemas de pesagem em movimento (WIM) coletados entre 2011 e 2018, a proporção de veículos com excesso de peso em relação ao total de veículos diminuiu após a implementação do método de cobrança em 2016, assim como a estimativa de dano precoce à infraestrutura viária.

2.2 PESAGEM EM MOVIMENTO EM ALTA VELOCIDADE (HS-WIM)

A pesagem em movimento, do inglês *Weigh-in-Motion* (WIM) pode ser definida como um processo de medição das cargas dinâmicas exercidas pelos eixos de veículos em movimento, estimando, assim, o peso estático de cada eixo/grupo de eixos e o Peso Bruto Total (PBT) do veículo (ASTM, 2002). Já a pesagem em movimento em alta velocidade, do inglês *High-Speed Weigh-in-Motion* (HS-WIM) é realizada na pista de rolamento e na velocidade diretriz das rodovias (VAN LOO; ŽNIDARIČ, 2019). Dessa forma, a operação de um sistema HS-WIM não exige que sejam feitas intervenções sobre o tráfego passante, podendo ser realizada sem a desaceleração dos veículos.

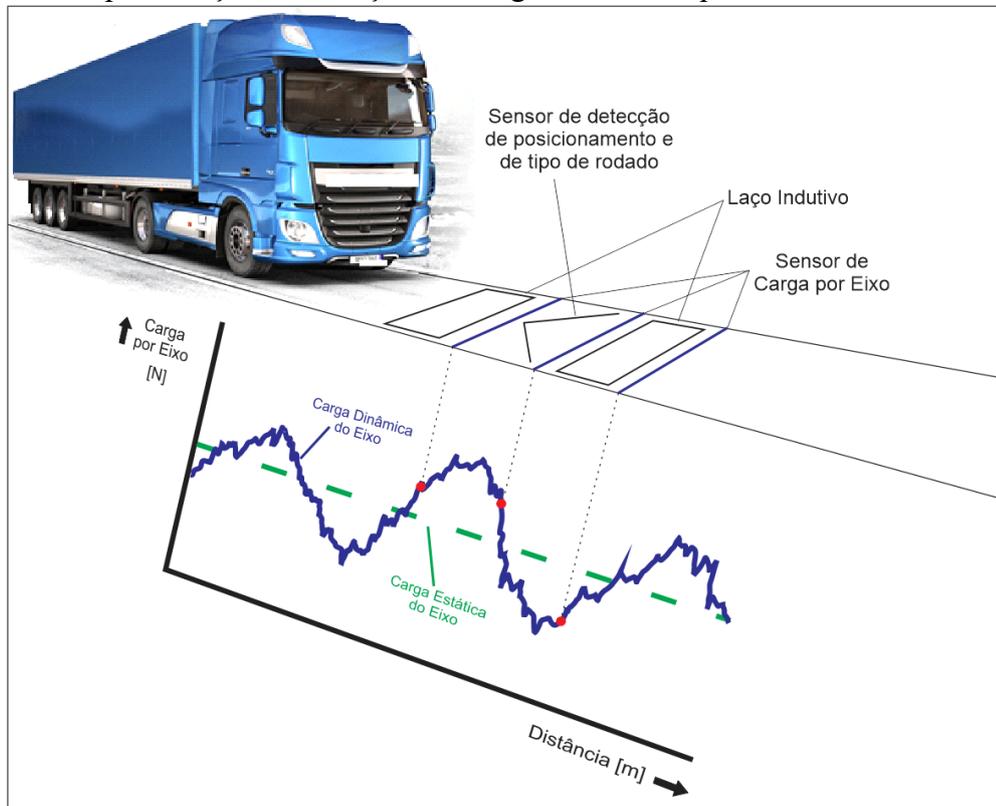
Segundo a definição da Administração Federal de Rodovias dos Estados Unidos (*Federal Highway Administration* – FHWA), o processo de pesagem de veículos em movimento é estruturado com o intuito de detectar e registrar o veículos, a configuração dos

seus eixos (quantidade e espaçamento) e as respectivas cargas por roda, por eixo e total (PBT), enquanto veículos trafegam sobre sensores instalados na rodovia ou sob pontes (FHWA, 2018). No processo de medição por um sistema WIM, o Peso Bruto Total (PBT) de um veículo está diretamente relacionado à sua massa total, enquanto os pesos por eixos/grupos de eixos estão relacionados à distribuição da massa do veículo sobre os seus eixos.

Os primeiros esforços para desenvolvimento de sistemas de pesagem em movimento (WIM) ocorreram na década de 1950, nos Estados Unidos, pelo Bureau de Rodovias Públicas do país (AL-QADI et al., 2016). Já na década de 1990, o primeiro documento visando a padronização de sistemas WIM foi publicado nos Estados Unidos pela Sociedade Americana para Testes e Materiais do inglês *American Society for Testing and Materials* (ASTM) (ASTM, 2002). Na Europa, a ação COST323 também forneceu especificações para o uso de WIM, culminando na elaboração de um pré-padrão europeu (COST, 1999).

A Figura 8 apresenta uma adaptação dos trabalhos de Van Loo e Žnidaric (2019) e Burnos et al. (2018), em que é demonstrada de forma ilustrativa o processo de medição das cargas dinâmicas para estimativa dos pesos estáticos por meio de um sistema HS-WIM.

Figura 8 - Representação da medição das cargas dinâmicas por um sistema HS-WIM.



Fonte: Autor (2021), adaptado de Van Loo e Žnidaric (2019) e Burnos et al. (2018)

Conforme demonstrado na Figura 8, as cargas dinâmicas medidas por um sistema HS-WIM variam ao longo do movimento do veículo. Além do movimento próprio de cada eixo e roda individual, as cargas dinâmicas exercidas pelas rodas e eixos de um veículo sobre o sensor de pesagem variam no tempo devido à dinâmica do próprio veículo em movimento. Esta dinâmica é resultante da interação do veículo com a superfície do pavimento e também de fatores externos como frenagem, aceleração, direção e vento (VAN LOO e ŽNIDARIČ, 2019).

Ainda segundo Van Loo e Znidaric (2019), a magnitude da variação de uma carga dinâmica depende de fatores relacionados à rodovia e ao veículo que nela trafega. De forma geral, quanto mais influências e perturbações sofridas pelo veículo enquanto ele se move pela pista de rolamento de uma rodovia, maiores são as variações dinâmicas da carga exercida por suas rodas e mais difícil será para o sistema WIM calcular com precisão as cargas estáticas. Nesse sentido, testes aplicados têm demonstrado que um sistema WIM instalado em um pavimento com bom estado de conservação tende a apresentar melhores resultados do que um sistema instalado em um pavimento em piores condições (GUERSON et al., 2016).

Além das informações de peso por eixo/grupo de eixos e PBT, é comum que os sistemas WIM, por si só, permitam a coleta de outros dados relativos à passagem de veículos sob o ponto monitorado na rodovia, tais como: número de eixos, distâncias entre eixos, velocidade da passagem e data e hora da passagem.

Entre outras aplicações, a pesagem em movimento em alta velocidade pode ser amplamente utilizada em atividades de controle do excesso de peso. As atividades mais difundidas apoiadas por sistemas HS-WIM neste contexto incluem: planejamento de fiscalização móvel, triagem de veículos para fiscalização em postos de pesagem, programas de *Company Profiling*, além da fiscalização direta (LABTRANS; DNIT, 2017).

Por fim, cabe ressaltar que a diferenciação da pesagem em movimento em alta velocidade, *High-Speed Weigh-in-Motion* (HS-WIM), da pesagem em movimento em baixa velocidade, do inglês *Low-Speed Weigh-in-Motion* (LS-WIM), se dá em função do local onde são instaladas e da velocidade de operação de cada tipo de tecnologia. Nesse sentido, considera-se HS-WIM os sistemas de pesagem em movimento que são instalados na pista de rolamento das vias e que operam na velocidade diretriz das mesmas (VAN LOO e ŽNIDARIČ, 2019).

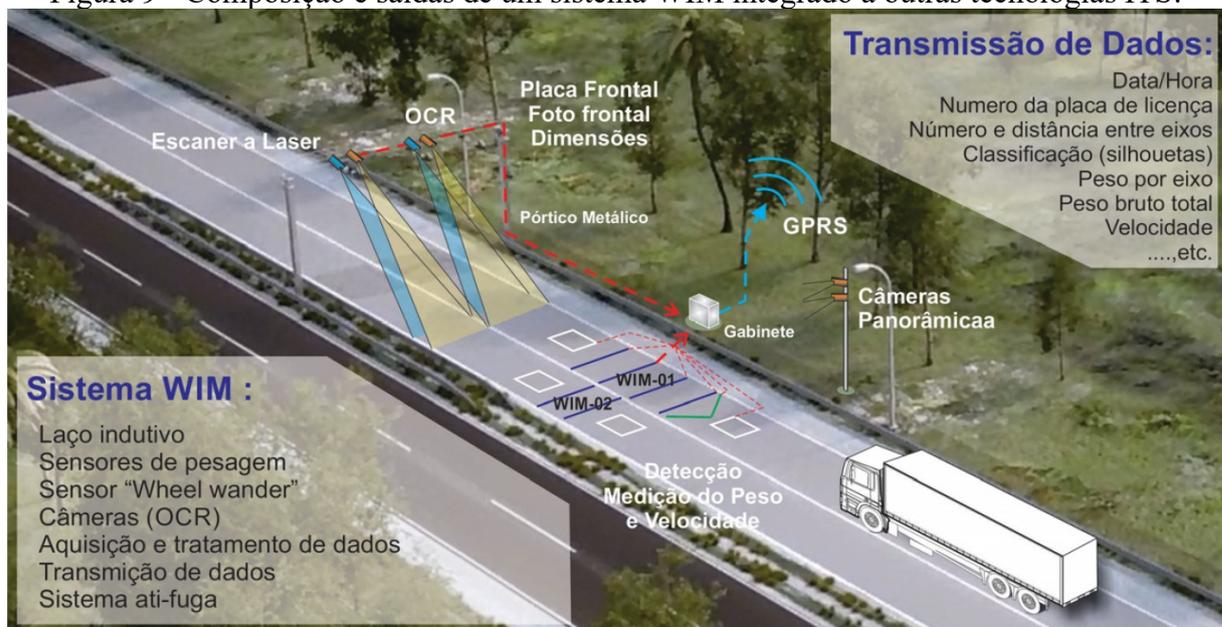
2.2.1 Composição e saídas de um sistema HS-WIM

Um sistema WIM convencional, instalado em rodovias, geralmente é composto pelos seguintes elementos principais (LABTRANS; DNIT, 2015):

- Sensores de carga.
- Laços indutivos.
- Sensores diagonais.
- Gabinete com eletrônica.

A Figura 9 apresenta uma ilustração conceitual, extraída do trabalho de Otto (2018), de um sistema HS-WIM de alto desempenho, integrado a múltiplas tecnologias do campo dos Sistemas Inteligentes de Transportes, *Intelligent Transportation Systems* (ITS).

Figura 9 - Composição e saídas de um sistema WIM integrado a outras tecnologias ITS.



Fonte: Otto (2018)

Os sensores de carga geralmente são instalados no pavimento das rodovias. No entanto, cabe ressaltar que a pesagem também pode ser feita com sensores acoplados a pontes ou, em casos de pesagem embarcada, esses sensores são instalados no próprio veículo. Mais informações sobre os sensores de carga são apresentadas no item 2.2.3.

Os laços indutivos são instalações retangulares formadas por fios incrustados no pavimento. Esse tipo de sensor pode auxiliar na detecção do veículo, na medição da sua velocidade e na sua classificação. Já os sensores diagonais são sensores de pressão de baixo custo que permitem a detecção do posicionamento transversal das rodas dos veículos sobre o

equipamento de pesagem na via e também viabiliza a detecção de eixos com rodado duplo, resultando em uma classificação mais detalhada dos veículos passantes.

O gabinete com a eletrônica de um sistema HS-WIM geralmente é instalado nas margens da rodovia, elevado sobre uma base de concreto ou suspenso em um poste. Esses gabinetes alojam a fonte de alimentação, a unidade de medição WIM e a unidade de processamento. Enquanto a unidade de medição WIM incorpora toda a eletrônica WIM, incluindo detectores de laços indutivos, amplificadores de carga para sensores de pesagem e unidades de pré-processamento, a unidade de processamento é um computador, geralmente industrial, onde o software de processamento WIM, o banco de dados e a interface de consulta podem ser instalados. Este conjunto de dispositivos geralmente opera com interfaces de comunicação convencionais (ex. Ethernet) e pode ser equipado com modems e conversores para fibra ótica.

Outros equipamentos frequentemente integrados em soluções de pesagem em movimento em alta velocidade são:

- Câmeras de Leitura Automática de Placas (LAP): câmeras otimizadas para reconhecimento e leitura de placas. Frequentemente possuem, incorporado, iluminadores noturnos;
- Câmera panorâmicas: câmera IP de alta definição para registro do veículo por um ângulo lateral;
- Painel de mensagem variável (PMV): painel (geralmente de LED), com a função de informar o condutor a respeito de peso, placa, etc.
- Scanner a Laser: Scanner para detecção 3D de formato e classificação veicular (por dimensionamento);

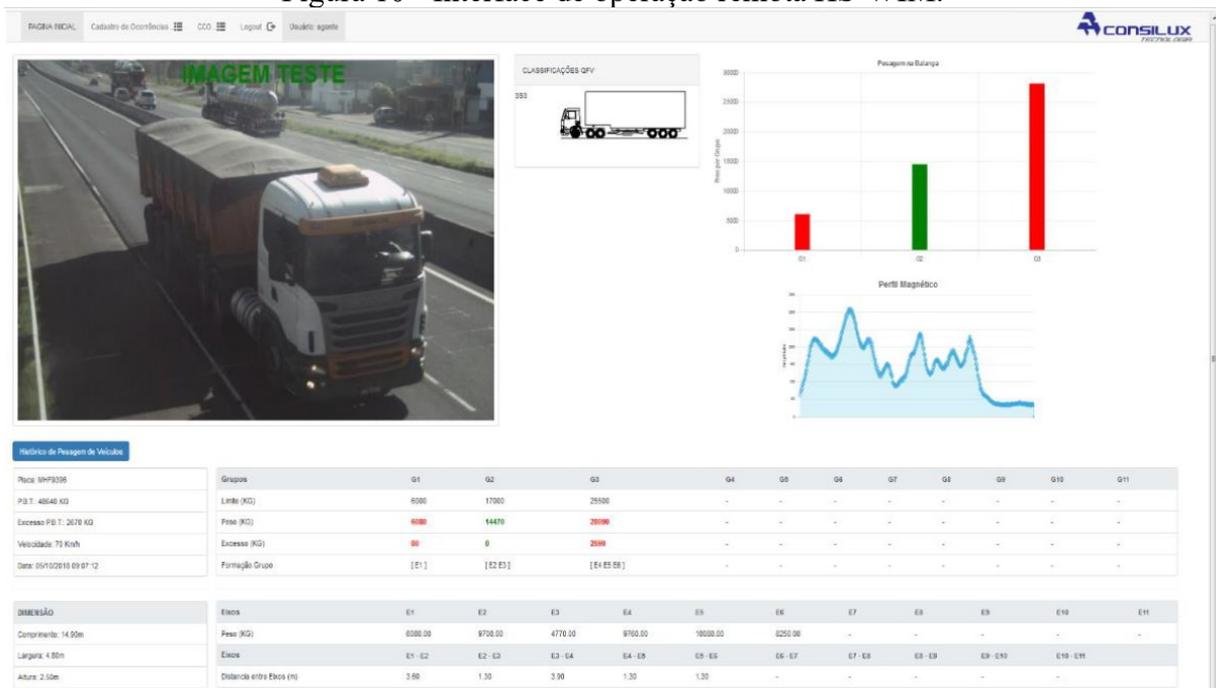
A composição exata de um sistema HS-WIM, com seus respectivos implementos, varia de acordo com o propósito de cada instalação. No entanto, independentemente da composição de equipamentos adotada, a passagem de cada veículo sobre um sistema WIM resulta basicamente nas seguintes saídas:

- Data e hora da passada
- Local da passada
- Peso bruto total (PBT)
- Peso por eixo/grupo de eixos
- Classe do veículo.
- Velocidade da passada.

- Número de eixos.
- Distâncias entre eixos.
- Comprimento (entre primeiro e último eixo).

A Figura 10 apresenta um exemplo de interface de operação remota de tecnologias HS-WIM, através da qual são extraídos os dados gerados pelo sistema, que opera continuamente sobre todas as passagens de veículos na rodovia onde é instalado.

Figura 10 - Interface de operação remota HS-WIM.



Fonte: Silva et al. (2019)

Os registros de passadas de veículos por sistemas HS-WIM são resultantes de uma associação de informações referentes ao veículo que passa sobre o sistema, com a localização onde a passada ocorre.

2.2.2 Aplicações de HS-WIM para controle do excesso de peso

Os limites e restrições relacionados ao peso de veículos rodoviários se baseiam, principalmente, na necessidade garantir a segurança do tráfego e limitar o desgaste que os veículos pesados causam à infraestrutura viária (DE CEUSTER et al., 2008). Considerando este contexto, a utilização de sistemas HS-WIM para controle do excesso de peso tem como propósito promover os níveis de conformidade e por consequência, reduzir ou controlar os

índices de excesso de peso praticados nas rodovias. Dentre as aplicações de sistemas HS-WIM especificamente voltadas para o controle do excesso de peso de veículos, destacam-se as seguintes:

- Planejamento da fiscalização móvel.
- Triagem de potenciais infratores.
- Fiscalização direta.
- Ações de prevenção ao excesso de peso.

A utilização de dados de sistemas HS-WIM para planejamento de unidades de fiscalização móvel visa prover informações sobre como, quando e onde o sobrepeso ocorre de forma mais frequente e severa na malha rodoviária, tendo o potencial de aumentar a efetividade dessas atividades de fiscalização. Neste contexto, o processamento adequado dos registros de veículos que passam sobre o sistema HS-WIM pode prover indicativos sobre os locais, os dias, os horários, os tipos de veículos e os tipos de irregularidades a serem priorizadas no processo de fiscalização. Nesse sentido, o trabalho de Fiorillo e Ghosn (2016) mostra um exemplo de algoritmo de processamento de dados HS-WIM para priorização de locais e horários da fiscalização.

Outra aplicação comum de sistemas HS-WIM que visa o controle do excesso de peso é a pesagem para triagem de potenciais infratores à velocidade diretriz da via. Nesse tipo de contexto, a ocorrência de potenciais excessos de peso, detectada pelo sistema HS-WIM, pode gerar alertas para os atores envolvidos na fiscalização, facilitando a sua efetividade na seleção e na abordagem de veículos para inspeção. A utilização de sistemas HS-WIM para triagem de potenciais infratores ocorre tanto em postos de pesagem fixos, como ocorre no Brasil (DNIT, 2014), quanto em unidades móveis de fiscalização, como se usa nos Estados Unidos (CAMBRIDGE; FHWA, 2009)

Nas últimas décadas, a aplicação de sistemas HS-WIM para fiscalização direta dos limites de peso de veículos tem sido um objetivo a ser alcançado por diferentes locais do mundo. Neste contexto, países como República Tcheca (DOUPAL; ADAMEOVA; KRIZ, 2016) e Hungria (RONAY-TOBEL et al., 2019) já encontraram meios de viabilizar a implementação dessa modalidade de fiscalização, enquanto outros locais como Brasil (SHINOHARA et al., 2016), França (JACOB; COTTINEAU, 2016) e Polônia (GAJDA et al., 2018) têm investido em pesquisas para consolidação dos desenvolvimentos técnicos, metrológicos e legais que tornarão efetiva essa modalidade de fiscalização em suas rodovias. Ao viabilizar inspeções automáticas e diretamente na pista de rolamento das rodovias, a implementação de sistemas

HS-WIM para fiscalização direta pode resultar em ganhos de eficiência no controle do excesso de peso de veículos, conforme primeiros resultados obtidos na Hungria, onde o volume de registros de infrações por excesso de peso se tornou cinco vezes maior, mesmo com apenas 15% da capacidade em operação (RONAY-TOBEL et al., 2019).

Por fim, os sistemas HS-WIM, principalmente as instalações de alto desempenho integradas a dispositivos de Leitura Automática de Placas (LAP), possibilitam o desenvolvimento de ações de prevenção ao excesso de peso em veículos rodoviários, que operam de forma complementar aos tradicionais processos de fiscalização, incentivando a autorregulação da indústria com influência sobre o transporte de cargas e passageiros e a promoção dos seus níveis de conformidade. Os sistemas HS-WIM, quando aplicados nesse tipo de contexto, são utilizados como ferramenta para caracterização do problema de excesso de peso ao qual se pretende endereçar, assim como para monitoramento da efetividade das ações de implementadas. Um exemplo de aplicação de sistemas HS-WIM nesse tipo de contexto ocorreu no Brasil, no piloto do Programa Nacional de Prevenção à Prática do Excesso de Peso, idealizado pelo Departamento Nacional de Transportes Terrestres (DNIT) (GUERSON et al., 2019).

2.2.3 Tecnologias HS-WIM

Independentemente da tecnologia de sensores utilizada, existem várias maneiras diferentes de medir o peso bruto de um veículo e as suas respectivas cargas por eixo e grupos de eixos. Considerando essa conjuntura, esta seção trata dos diferentes tipos de sensores e balanças utilizados para a pesagem em movimento em alta velocidade.

Segundo informações do Guia para Usuários de Sistemas de Pesagem em Movimento (2019), desenvolvido pela Sociedade Internacional de Pesagem em Movimento (ISWIM) as tecnologias mais comuns de sistemas para pesagem em movimento em alta velocidade (HS-WIM) podem ser divididas em quatro grupos, sendo esses:

- Sensores em linha.
- Balanças.
- Bridge WIM.
- Pesagem Embarcada.

Cada um dos tipos de tecnologias listados será tratado em maior nível de detalhe nas subseções que seguem. Os conceitos e explicações fornecidos nas seções abaixo se baseiam na

Revisão de Sistemas WIM do Programa Avaliação de Pontes em Longo Prazo (*Long-Term Bridge Performance Program-LTBP*) (AL-QADI et al., 2016), no volume 1 do Guia de Bolso para Sistemas de Pesagem em Movimento da FHWA (FHWA, 2018) e no Guia para Usuários de Pesagem em Movimento desenvolvido pela Sociedade Internacional de Pesagem em Movimento (*International Society for Weigh-in-Motion-ISWIM*) (VAN LOO; ŽNIDARIČ, 2019).

2.2.3.1 Sensores em linha

Os sensores HS-WIM do tipo “em linha” foram introduzidos na década de 1970, e forneciam soluções de baixo custo e menos intrusivas, alternativas às balanças de pesagem em movimento da época. Esses sensores são instalados por meio de cortes na camada superior do pavimento e são fixados com algum tipo de resina, geralmente do tipo epóxi. Dependendo da tecnologia utilizada, esses sensores podem ser instalados abaixo da superfície de contato do pavimento, ou são instalados e lixados de forma a fazer parte da própria superfície. O custo de fabricação, instalação e manutenção deste tipo de sensor é relativamente reduzido, em comparação com as balanças e placas de pesagem (VAN LOO; ŽNIDARIČ, 2019).

Os sensores em linha têm como característica serem mais estreitos do que do que a área de contato do pneu do veículo com a rodovia, portanto, adquirem um sinal de medição no momento em que a roda ou o eixo exerce uma presença sobre o sensor. Neste contexto, é necessário conhecer a velocidade do veículo e integrar o sinal da carga com o fator tempo, permitindo que se obtenha a força empenhada através roda ou do eixo. Em comparação com as balanças em geral, os sensores de linha são mais sensíveis à rigidez do pavimento e, conseqüentemente, às variações de temperatura (FHWA, 2018).

De acordo com Guia para Usuários de Pesagem em Movimento desenvolvido pela ISWIM (2019), as tecnologias de sensores em linha mais comuns são:

- Sensores piezo-polímeros.
- Sensores piezo-cerâmicos.
- Sensores de fibra ótica.
- Sensores piezo-quartzo.
- Sensores baseados em *strain gauge*.

Os sensores piezo-polímeros são compostos por um cabo coaxial plano, coberto com uma folha externa de metal espesso e um filme piezoelétrico em espiral ao redor de um fio de

cobre revestido de prata. Quando uma força é aplicada sobre um sensor piezo-polímero, essa interação resulta em um sinal entre o núcleo e as suas camadas externas. Dentre as tecnologias de sensores em linha, estes sensores são considerados entre os mais sensíveis à variação de temperatura. Ainda, em comparação com os demais sensores, os piezo-polímeros são relativamente finos (pouco intrusivos), flexíveis e de baixo custo (FHWA, 2018).

Já um sensor HS-WIM piezo-cerâmico consiste de um cabo coaxial revestido por um tubo de cobre, que contém um pó cerâmico piezoelétrico polarizado e um fio de cobre passando pelo seu centro. Quando uma força é aplicada sobre o cabo, isso resulta em um sinal entre o núcleo e o revestimento do sensor. Esse tipo de sensor oferece uma solução intermediária tanto em termos de precisão quanto em relação ao custo (AL-QADI et al., 2016).

Os sensores piezo-polímeros e piezo-cerâmicos são similares em termos de custo e desempenho (FHWA, 2018). A Figura 11 apresenta uma imagem de uma instalação HS-WIM com sensores piezo-cerâmicos.

Figura 11- Instalação com sensores piezo-cerâmicos.



Fonte: ECM (2017)

Os sensores HS-WIM feitos de cabos ou tiras de fibra ótica medem a força que atua sobre o cabo através da medição das mudanças nas características do feixe de luz. Ao longo dos anos, muitos tipos diferentes de sensores de fibra ótica foram desenvolvidos e testados, mas ainda não são comercializados em grande escala, devido a problemas de durabilidade e compensação de efeitos da temperatura (VAN LOO; ŽNIDARIČ, 2019). Recentemente, uma nova geração de sensores WIM de fibra ótica foi desenvolvido, buscando níveis de desempenho mais elevados, compatíveis com as aplicações voltadas à fiscalização de veículos (OPTIWIM, 2019).

Os sensores piezo-quartzo consistem de uma série de discos de quartzo montados em um perfil de alumínio. Quando uma força é submetida sobre sensor, gera-se uma carga elétrica proporcional. Os sensores piezo-quartzo têm sido documentados com baixa sensibilidade a variações de temperatura e relativa boa precisão, a um custo acima da média dos demais sensores (VAN LOO; ŽNIDARIČ, 2019). Há uma variedade dos sensores piezo-quartzo que pode ser instalada por baixo da superfície do pavimento, possuindo maior durabilidade, porém menor precisão do que o tipo convencional (KISTLER, 2020).

Por fim, os sensores HS-WIM baseados em *strain gauge* para HS-WIM são compostos por uma barra com múltiplos medidores que, a partir do o nível deformação da barra, determinam a carga exercida pela roda ou pelo eixo do veículo passante. Os sensores *strain gauge* e os sensores piezo-quartzo geralmente são utilizados em aplicações que exigem maior nível de desempenho, como aquelas relacionadas ao controle do excesso de peso em rodovias. Além do desempenho, esses dois tipos de sensores também são similares em relação ao tipo de instalação (FHWA, 2018; VAN LOO; ŽNIDARIČ, 2019). A Figura 12 apresenta uma imagem de uma instalação com sensores HS-WIM da tecnologia piezo-quartzo.

Figura 12 - Instalação com sensores piezo-quartzo.



Fonte: Sterela (2014)

2.2.3.2 Balanças

As balanças ou placas de pesagem em movimento em alta velocidade (HS-WIM) são placas instrumentadas montadas sobre uma armação rígida, fixado na estrutura do pavimento, medindo as forças verticais exercidas pelo pneu dos veículos em movimento. Nesses casos, a extensão da balança no pavimento é geralmente maior do que área de contato do pneu e a sua largura pode cobrir uma roda ou um eixo inteiro de um veículo (VAN LOO; ŽNIDARIČ, 2019). As principais tecnologias de balanças HS-WIM são:

- Células de carga.
- *Bending plates*.

As células de carga de uma balança rodoviária são unidades transdutoras que convertem em um sinal eletrônico uma carga ou uma força exercida sobre si. O princípio de medição pode ser baseado em diferentes tecnologias, tais como: capacitiva, hidráulica, piezométrica, pneumática, *strain gauge* ou fio vibratório. Neste tipo de balança, uma ou mais células de carga são montadas entre uma placa rígida de metal e a estrutura de suporte. Assim, as células de carga medem as forças verticais exercidas através pela roda ou pelo eixo do veículo sobre a placa. Esse tipo de tecnologia é usado tanto para baixa velocidade (LS-WIM) quanto para aplicações de alta velocidade (HS-WIM). A implantação de balanças com células de carga em aplicações alta velocidade tendem a resultar boa precisão a um custo relativamente elevado.

As *bending plates* são um tipo de balança cuja tecnologia é baseada em placas de flexão. Em sua instalação, as placas são apoiadas por uma armação em contato com as suas bordas e instrumentadas com *strain gauges*, que medem o nível de flexão da placa enquanto uma roda ou um eixo a atravessa sobre ela. Assim, a partir das deformações medidas, calcula-se a força vertical aplicada no mesmo local. Combinando vários *strain gauges* em uma balança, a localização transversal da roda pode ser estimada e a força vertical medida torna-se quase independente nela. Em geral, esses sensores têm boa precisão, custo médio e são utilizados principalmente para HS-WIM e balanças de eixo (FHWA, 2018).

2.2.3.3 *Bridge WIM*

Os sistemas de pesagem em movimento em pontes, também conhecidos como *Bridge WIM* (B-WIM) foram introduzidos nos Estados Unidos no final dos anos 1970 (MOSES, 1979). Na aplicação deste tipo de tecnologia, a própria estrutura de uma ponte existente é utilizada como balança de pesagem dos eixos dos veículos em movimento. Isso é realizado por meio do monitoramento de deformações na superestrutura da ponte (vigas ou lajes), que são influenciadas pelos veículos que trafegam sobre a parte superior. Um exemplo de sistema B-WIM é mostrado na Figura 13.

Figura 13- Instalação com sensores de pesagem em movimento em pontes.



Fonte: FHWA (2018)

Os sistemas B-WIM mais modernos fornecem o mesmo tipo de saída que qualquer sistema HS-WIM convencional, além de informações adicionais que podem ajudar na avaliação estrutural de pontes, tais como medições de deformação, linhas de influência (como a ponte se comporta com a carga exercida sobre ela) fatores de distribuição de carga (como a carga é transferida em toda a estrutura) e amplificação dinâmica da carga.

A calibração e a operação de sistema B-WIM são similares aos sistemas HS-WIM de pavimento, sendo a instalação mais simples e menos intrusiva. Na maioria dos casos, não são necessários sensores na superfície do pavimento e, conseqüentemente, o tráfego não é interrompido durante a instalação e a manutenção. Por fim, embora os sistemas B-WIM sejam usados para instalações permanentes, seus principais benefícios estão associados à sua portabilidade (VAN LOO; ŽNIDARIČ, 2019).

2.2.3.4 Pesagem Embarcada

Os sistemas embarcados de pesagem dinâmica de veículos são capazes de estimar o peso bruto de veículos e de seus eixos através de uma instrumentação do próprio veículo. Este tipo de tecnologia é uma evolução dos sistemas embarcados de pesagem estática, que são utilizados na indústria de transportes há mais de uma década e pesam o veículo quando ele está parado, por exemplo, em estacionamentos, áreas de descanso ou semáforos (KENYON, 1996). Em um sistema de pesagem embarcada dinâmica, os valores de peso são monitorados continuamente por meio de amostragem. Assim como em qualquer sistema HS-WIM convencional, os valores de peso estático são estimados com base nas cargas dinâmicas exercidas sobre os eixos e rodas.

Uma experiência bem-sucedida com o uso de sistemas de pesagem embarcada ocorre na Austrália, onde este tipo de instrumentação é utilizado para controle e monitoramento do tráfego de veículos especiais, cujas cargas ou dimensões excedem o padrão convencional. Nesta aplicação, a instrumentação do veículo é feita pela indústria de transportes como contrapartida ao acesso cedido a esses veículos para trafegar por determinado trecho viária (COLEMAN et. al, 2012).

Para fins de comparação entre as principais tecnologias HS-WIM, o Quadro 1 apresenta um resumo das aplicações, vantagens, limitações e custos entre diferentes sensores e balanças de pesagem em movimento, baseando-se em informações contidas no Guia de Bolso para Sistemas de Pesagem em Movimento da FHWA (FHWA, 2018). Com o intuito de evitar

equivocos na estimativa dos intervalos de custos citados, os valores são apresentados em dólares americanos. Portanto, para estimativa desses valores em condições nacionais brasileiras, deve-se considerar as taxas de câmbio e de importação vigentes.

Quadro 1 – Comparação de diferentes tecnologias HS-WIM.

Tecnologia	Aplicações recomendadas	Principais vantagens	Principais limitações	Custo médio aproximado de aquisição e instalação (1 faixa)
Células de carga	Planejamento de transportes, projeto de rodovias e fiscalização.	Alto desempenho.	Utilização limitada a pavimentos de concreto e alto custo de aquisição e manutenção.	\$44.000 - \$53.000
<i>Bending plate</i>	Planejamento de transportes, projeto de rodovias e fiscalização.	Alto desempenho.	Utilização limitada a pavimentos de concreto e custo de aquisição moderado.	\$18.000 - \$28.000
Piezo-quartzo	Planejamento de transportes, projeto de rodovias e fiscalização.	Alto desempenho e baixo custo de manutenção.	Custo de aquisição moderado.	\$16.000 - \$24.000
<i>Strain gauge</i> (em linha)	Planejamento de transportes, projeto de rodovias e fiscalização.	Alto desempenho e baixo custo de manutenção.	Poucos registros do seu desempenho em longo prazo.	\$16.000 - \$24.000
Piezo-polímero	Planejamento de transportes.	Baixo custo de aquisição e de manutenção.	Sensibilidade a mudanças de temperatura e necessidade de recalibração frequente.	\$4.000 - \$6.400

Fonte: Autor (2021), baseado em FHWA (2018)

No Quadro 1, não estão incluídos nesses valores a instalação da eletrônica, obras civis de infraestrutura relacionada à eletrônica (tais como instalação de postes, passagens de cabos, etc), calibração inicial e licenças básicas de software das soluções tecnológicas. Esses valores variam entre diferentes regiões geográficas e fornecedores de soluções HS-WIM. No entanto, de acordo com a FHWA (2018), que foi desenvolvido seu manual para ser aplicado em

condições norte-americanas, esses valores adicionais representam entre \$41.000 e \$113.000 adicionais.

2.3 CONTROLE DO EXCESSO DE PESO DE VEÍCULOS NO BRASIL

O crescimento da quantidade de veículos pesados e das rotas de tráfego em uma malha vária desafia os órgãos rodoviários a encontrarem métodos para garantir a efetividade do controle do excesso de peso sem aumentar os custos relacionados a esse controle. No Brasil, essa busca tem impulsionado o desenvolvimento de métodos e tecnologias que visam o aprimoramento dos processos de controle do excesso de peso de veículos, de forma a absorver o crescente número de veículos e coibir os carregamentos ilegais de carga.

Esta seção do trabalho aborda questões consideradas relevantes para a definição do excesso de peso de veículos em condições brasileiras e fornece uma visão geral sobre os métodos para controle do excesso de peso de veículos atualmente experimentados no Brasil. Para isso, são apresentadas as definições de excesso de peso de veículos em território nacional, os regulamentos que incidem sobre os limites de peso e tolerâncias, e, por fim das características dos métodos atualmente adotados ou em implementação no país, que visam o controle do excesso de peso de veículos.

2.3.1 Tipificação do excesso de peso no Brasil

No Brasil, a infração por sobrepeso veicular pode ocorrer de três formas distintas, conforme prevê a Portaria nº 03 do DENATRAN, de 06 de janeiro de 2016. Essas diferentes formas de se cometer uma infração de trânsito são chamadas de enquadramentos. Assim, os enquadramentos previstos para o excesso de peso de veículos são:

- 683-1/1: Transitar com excesso no PBT, exclusivamente.
- 683-1/2: Transitar com excesso de peso por eixo, exclusivamente.
- 683-1/3: Transitar com excesso no PBT e nos eixos, simultaneamente.

O enquadramento 683-1/1 é atribuído a veículos que trafegam com excesso no PBT, mas que não excedem os limites peso nos eixos. Já o enquadramento 683-1/2 trata de veículos com excesso nos eixos, mas que não excedem os limites de PBT. Por fim, o enquadramento 683-1/3 é atribuído aos veículos com excesso no PBT e nos eixos, simultaneamente.

2.3.2 Limites de peso e tolerâncias

O inciso V, do artigo 231, do Código de Trânsito Brasileiro (CTB), trata das infrações de trânsito cometidas por transitar com o veículo com excesso de peso. Os limites de peso para circulação de veículos, por sua vez, são, atualmente, determinados pela Resolução nº 210, do CONTRAN, de 13 de novembro de 2006. No mesmo contexto, a Resolução do CONTRAN nº 526, de 29 de abril de 2015, estabelece as tolerâncias de 5% sobre os limites de Peso Bruto Total (PBT) e de 10% sobre os limites por eixo e por grupos de eixos de veículos.

2.3.3 Classificação veicular e os limites de peso

De acordo com os regulamentos de trânsito vigentes no Brasil, os diferentes tipos de veículos pesados possuem limites de peso distintos. Assim, um sistema de pesagem utilizado para controle do excesso de peso deve estar apto a realizar a classificação dos veículos pesados, para que seja possível determinar os seus limites de peso e, por consequência, as eventuais ocorrências de sobre peso.

No Brasil, o regulamento que estabelece a divisão das classes de veículos pesados, com seus respectivos limites de peso, é a Portaria nº 63, do DENATRAN, de 11 de março de 2009. Baseando-se nessa portaria, o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) desenvolveu um documento próprio, intitulado Quadro de Fabricantes de Veículos (QFV), que é utilizado como referência de nomenclatura para as classes de veículos por organizações responsáveis pelo controle do excesso de peso no Brasil.

De acordo com a interpretação dos parâmetros previstos na Portaria nº 63/2009, verifica-se que a classificação de veículos pesados, visando à determinação de seus limites de carga, é realizada com base na identificação da configuração de eixos e do comprimento total dos veículos. Um sistema HS-WIM, quando configurado da maneira adequada, pode realizar a detecção dessas variáveis, viabilizando a classificação automática dos veículos, conforme os regulamentos vigentes.

2.3.4 Meios para controle do excesso de peso de veículos no Brasil

O controle do excesso de peso de veículos no Brasil é realizado de forma predominante através de postos de pesagem veicular (PPVs), que são compostos por estruturas fixas

localizadas às margens das rodovias, onde se realiza a inspeção de veículos e consequente autuação em caso de irregularidades. Os PPVs são amplamente utilizados para o controle do excesso de peso de veículos no Brasil e vêm se modernizando ao longo das últimas décadas em relação ao método de triagem de veículos potencialmente infratores e à forma de atuação do agente da autoridade de trânsito na sua operação.

Na década de 1970, o governo federal brasileiro, através do então Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), implementou no país os primeiros PPVs com tecnologias de pesagem em movimento (LABTRANS; DNIT, 2007). Nesses postos utiliza-se um sistema de pesagem em movimento para pré-seleção de veículos potencialmente infratores (Pista Seletiva) e outro sistema WIM, de alta precisão, para fiscalização de veículos em velocidades de até 12 km/h (Pista de Precisão). A Figura 14 mostra a imagem aérea de um PPV da Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT), localizado na rodovia BR-163, km 108, em Rondonópolis/MT.

Figura 14 - PPV de Rondonópolis/MT.

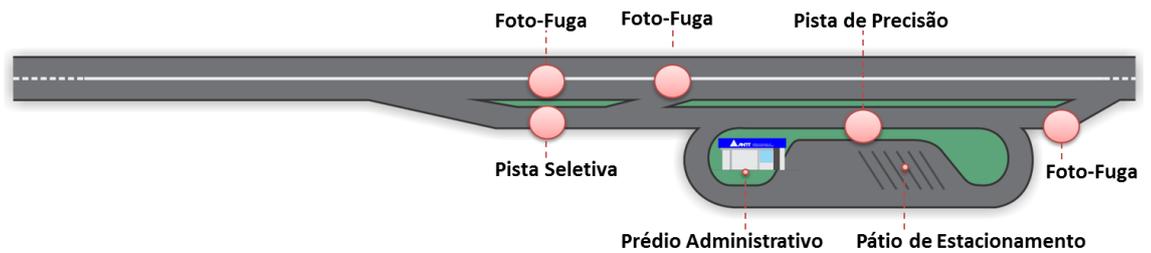


Fonte: TribunaMT (2019)

Desde a sua introdução, os Postos de Pesagem Veicular (PPVs) consolidaram-se como um dos principais meios de fiscalização dos limites de peso de veículos no país. Hoje, os PPVs operam com dois leiautes distintos em função do modelo de Pista Seletiva adotado. Nesse

sentido, a Figura 15 exibe, de forma simplificada, o leiaute de um PPV com Pista Seletiva Convencional (LABTRANS; ANTT, 2018b).

Figura 15 - PPV com Pista Seletiva Convencional.

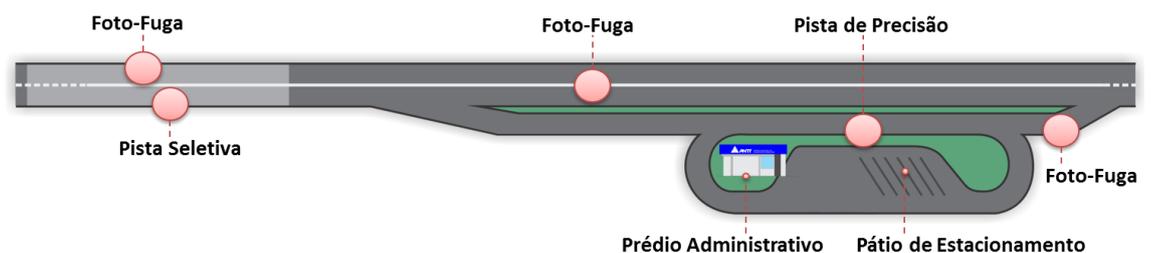


Fonte: ANTT (2018)

Nesse modelo convencional de posto de pesagem, os veículos pesados que se aproximam da área de fiscalização são orientados, através de sinalização vertical, a saírem da rodovia e adentrarem o posto de fiscalização. Após a entrada, os veículos passam pela Pista Seletiva, localizada às margens da pista de rolamento da rodovia, onde serão pesados em velocidades de até 60 km/h para identificação de potenciais infratores e encaminhamento à Pista de Precisão.

A partir de 2014, foi introduzido ao contexto rodoviário Brasileiro um novo modelo de operação para os PPVs, no qual a triagem de potenciais infratores passou a ser realizada por meio de sistemas HS-WIM (SHINOHARA et al., 2016). Nos PPVs com Pista Seletiva HS-WIM, a pesagem seletiva ocorre na própria rodovia, na velocidade diretriz da pista de rolamento. Nesse sentido, a Figura 16 exibe, de forma simplificada, o leiaute de um PPV cuja pista seletiva é composta por sistema de pesagem em movimento em alta velocidade (ANTT e LABTRANS, 2018).

Figura 16 - PPV com Pista Seletiva HS-WIM.



Fonte: ANTT (2018)

Nessa configuração de posto, os veículos pesados são orientados, através de sinalização vertical, a manterem-se na faixa da direita, onde se realiza, através do sistema HS-WIM, o processo de pré-seleção para identificação de potenciais infratores. Caso sejam selecionados, os veículos são orientados por dispositivos luminosos a saírem da rodovia e adentrarem a Pista de Precisão, onde uma segunda inspeção para fiscalização é desempenhada.

Além das inovações em relação à triagem de veículos potencialmente infratores, visando à efetividade dos processos de inspeção, a operação dos PPVs no Brasil foi regulamentada de forma a possibilitar a operação com o conceito de Agente Remoto, no qual o controle da operação do Posto e as atividades inerentes à fiscalização são realizados pelo agente da autoridade de trânsito de forma remota, através de um Centro de Controle Operacional (CCO). Esse elemento visa a maximizar a eficiência na execução das tarefas do agente de trânsito, que poderá atuar, com segurança, na operação de mais de um Posto, simultaneamente (DNIT, 2016).

Ainda no campo da fiscalização rodoviária, as balanças móveis de operação em baixa velocidade passaram a ser utilizadas em maior escala nas rodovias federais do Brasil. Esse tipo de operação ganhou notoriedade quando o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) implementou a suas Unidades Móveis de Operação (UMO), o que culminou na operação de 61 balanças móveis de pesagem em movimento em baixa velocidade para fins de fiscalização (DNIT, 2017). A Figura 17 apresenta o registro de uma UMO, em operação na rodovia BR-364, em Alto Garças/MT, próximo a um posto da Polícia Rodoviária Federal (PRF).

Figura 17- UMO em operação com sistema LS-WIM móvel.



Fonte: Estradas (2019)

Segundo estabelece o Código de Trânsito Brasileiro (CTB), em seu Art. 99, Inciso 1º, o excesso de peso de veículos também pode ser aferido por meio da verificação de documentos fiscais. No Brasil, esta modalidade de fiscalização é frequentemente desempenhada pelas polícias rodoviárias estaduais e federal, em rodovias onde não há balanças em operação (LABTRANS; DETRAN-ES, 2018). Para facilitar fiscalização do peso por documento fiscal, a Resolução do CONTRAN nº 290, que exige a inscrição obrigatória na plaqueta do veículo de informações sobre sua tara e peso bruto (REIS, 2016). Assim, durante o processo de inspeção, o valor da tara do veículo é somado ao peso total da carga declarada nos documentos fiscais.

Além dos esforços para modernização e diversificação dos meios para fiscalização do peso de veículos, as organizações rodoviárias brasileiras passaram a investir na adoção de estratégias alternativas para controle do excesso de peso, a fim de complementar os métodos mais tradicionais de fiscalização. Neste contexto, o DNIT publicou os resultados de projeto-piloto para o Programa Nacional de Prevenção à Prática de Sobre peso, no qual dados de sistemas HS-WIM foram utilizados para o desenvolvimento de ações de prevenção especificamente voltadas para as características do transporte de cargas local (GUERSON et al., 2019). Em uma abordagem similar, o Departamento Estadual de Trânsito do Espírito Santo (DETRAN-ES), realizou estudos técnicos para a implementação do Programa Voluntário de Monitoramento Logístico (PVML), que prevê a utilização de uma rede de sistemas HS-WIM

para fins de prevenção à prática de irregularidades com impacto sobre a segurança do transporte de rochas ornamentais, incluindo o excesso de peso (LABTRANS; DETRAN-ES, 2018).

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SISTEMÁTICA

Uma revisão bibliográfica sistemática tem como intuito agrupar todas as evidências empíricas que se encaixam em determinados critérios pré-estabelecidos, a fim de responder a uma pergunta de pesquisa específica. Para isso, são utilizados métodos explícitos e sistemáticos, selecionados com o objetivo de minimizar os possíveis vieses da pesquisa, fornecendo evidências mais confiáveis a partir das quais conclusões podem ser tiradas e decisões tomadas (HIGGINS; GREEN S, 2008). Considerando o contexto apresentado e tendo em vistas a intenção de se elaborar um método de apoio à definição de ações de controle ao excesso de peso baseado no processamento de dados de sistemas de pesagem em movimento em alta velocidade, *High-Speed Weigh-in-Motion* (HS-WIM), a realização de uma revisão bibliográfica sistemática é importante para que se identifique o estado da arte no que diz respeito à aplicação de técnicas de mineração de dados sobre bases de dados HS-WIM, para extração de informações relevantes para o controle do excesso de peso de veículos, trazendo contexto sobre a contribuição proposta pelo presente trabalho.

3.1 DEFINIÇÃO DO ROTEIRO DA REVISÃO SISTEMÁTICA

Segundo Cochrane (2001), organização de pesquisas na área da saúde e uma das precursoras no desenvolvimento de revisões sistemáticas, as principais características desta tipo de revisão são:

- Um conjunto de objetivos claramente definidos com critérios de seleção de estudos pré-estabelecidos para estudos.
- Uma metodologia explícita e reprodutível.
- Uma pesquisa sistemática que tenta identificar todos os estudos que atendam aos critérios de elegibilidade.
- Uma verificação da validade dos resultados dos estudos selecionados, por exemplo, através da avaliação de risco de viés.
- Uma apresentação sistemática e resumida das características e resultados dos estudos selecionados.

Caso essas recomendações da organização Cochrane fossem traduzidas em um método objetivo, seria possível deduzir a seguinte sequência de ações:

- Definir objetivos da pesquisa e critério de seleção de evidências

- Definir e explicitar metodologia de pesquisa
- Identificar todas os estudos prévios que atendam aos critérios de seleção pré-estabelecidos
- Verificar validade dos estudos selecionados
- Apresentar características e resultados dos estudos selecionados.

De acordo com Tranfield (2003), desde a década de 1980, os idealizadores de políticas públicas têm dado crescente ênfase em assegurar que as políticas e práticas sejam desenvolvidas através de uma base de evidências mais rigorosa. Este movimento baseado em evidências promoveu a adoção de revisões sistemáticas, algo que teve um grande impacto em determinadas disciplinas.

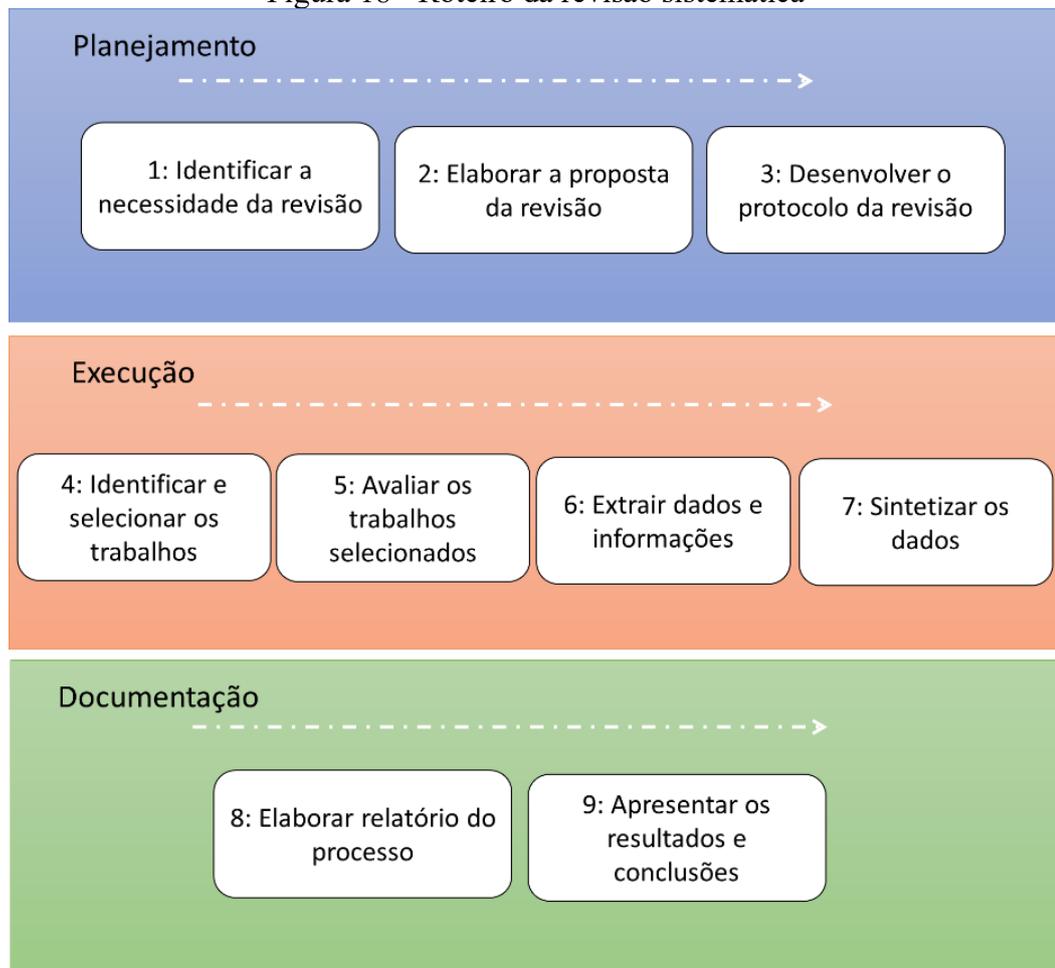
Desde sua introdução, as revisões sistemáticas se tornam, a cada dia, mais importantes na ciência, principalmente para a área da saúde. Os clínicos leem esse tipo de trabalho para se manterem atualizados sobre o seu campo de atuação, e as revisões são frequentemente utilizadas como referência para o desenvolvimento de orientações para a prática médica (MOHER et al., 2009).

Cabe ressaltar que as revisões sistemáticas não se restringem a área da saúde. Realizar uma revisão da literatura para fornecer as melhores evidências para o desenvolvimento de políticas e práticas é um objetivo-chave de pesquisa para as respectivas comunidades acadêmicas e profissionais de qualquer disciplina. (TRANFIELD et al., 2003).

Especificamente, a presente revisão sistemática visa responder à seguinte pergunta de pesquisa: “Como os conceitos e técnicas relacionadas à mineração de dados foram até hoje utilizadas (e documentadas) para a extração de conhecimentos de bases de dados HS-WIM?”. Assim, busca-se a obtenção de uma visão geral sobre o estado da arte da aplicação de mineração de dados sobre bases de dados HS-WIM, contextualizando a contribuição realizada pelo presente trabalho.

Neste trabalho, a revisão sistemática será realizada conforme roteiro especificado por Tranfield (2003), sendo composto por três fases e um total de nove etapas. A sequência de fases e etapas do referido roteiro estão expostas no infográfico da Figura 18.

Figura 18 - Roteiro da revisão sistemática



Fonte: Autor (2021)

O objetivo geral desta dissertação é o desenvolvimento de um método para apoio à tomada de decisão na definição de estratégias para controle do excesso de peso em veículos rodoviários, com base no processamento de dados de tráfego e de carga de sistemas de pesagem em movimento em alta velocidade, do inglês *High-Speed Weigh-in-Motion* (HS-WIM). Para isso, a revisão bibliográfica sistemática realizada neste capítulo busca a identificação de trabalhos que abordam o processamento de grandes quantidades de dados de sistemas HS-WIM, para caracterização do tráfego e das cargas de veículos pesados em rodovias.

A execução de cada etapa da revisão será detalhada nas seções que seguem.

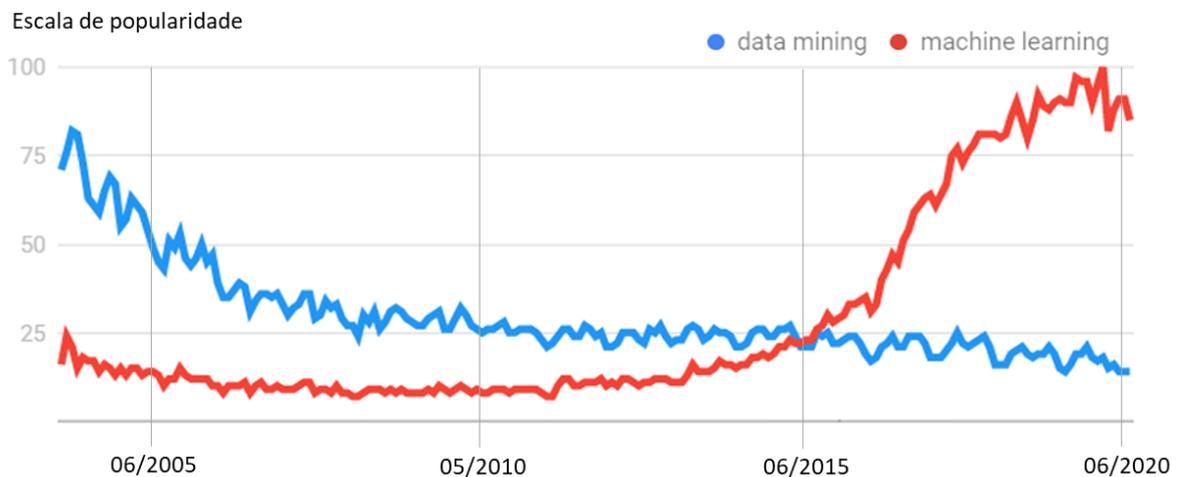
3.2 ETAPA 1 - IDENTIFICAR A NECESSIDADE DA REVISÃO

O presente trabalho consiste na elaboração de um método de apoio à tomada de decisão na definição de estratégias de controle do excesso de peso, baseando-se na extração de conhecimento de bases de dados de sistemas HS-WIM. Nesse sentido, esta revisão sistemática foi realizada com o intuito de identificar o estado da arte, ou seja, o nível mais alto de desenvolvimento da aplicação de técnicas de mineração de dados para extração de conhecimentos sobre as cargas e sobre o tráfego de veículos pesados, a partir de bases de dados de sistemas HS-WIM.

Segundo Fuller et al. (2017) a Mineração de Dados, do inglês *Data Mining*, pode ser definida como o processo de extração de informações novas e úteis a partir de bases de dados. A mineração de dados e o aprendizado de máquina são conceitos que, frequentemente, utilizam as mesmas técnicas estatísticas e que são difíceis de se diferenciar na prática (YOO et al., 2012). O termo Extração de Conhecimento, comumente tratado em inglês como *Knowledge Extraction* ou *Knowlegde Discovery*, também possui um significado muito parecido com a Mineração de Dados (ALCALÁ-FDEZ et al., 2009, 2011).

Além de possuírem definições similares, os termos *Data Mining* e *Machine Learning* tem variado a sua popularidade relativa ao longo dos anos. Essa análise foi realizada com auxílio da ferramenta *Google Trends*, conforme mostrado na Figura 19.

Figura 19 – Análise comparativa da popularidade dos termos *Data Mining* e *Machine Learning* ao longo de 15 anos



Fonte: Autor, adaptado do *Google Trends* (2020)

A ferramenta *Google Trends* fornece um indicador de popularidade de determinado termo ou palavra-chave, com base na quantidade relativa de pesquisas realizadas na plataforma *Google* ao longo do tempo. Os valores mostrados no gráfico refletem, proporcionalmente, a quantidade de pesquisas que foram realizadas com aquele termo em relação ao total de pesquisas realizadas no *Google*. Nesse sentido, os dados de popularidade são normalizados e apresentados em uma escala de 1 a 100.

No gráfico da Figura 19, verifica-se entre que, entre 2005 e meados de 2015 o termo “*Data Mining*” se mostrou mais popular do que o termo “*Machine Learning*”, com base nas pesquisas realizadas na plataforma *Google*. A partir de julho de 2015, o termo “*Machine Learning*” se mostrou mais popular em relação ao termo “*Data Mining*”, que por sua vez, tem mostrado uma tendência de queda de popularidade nos últimos 15 anos.

Para que seja possível tornar mais clara a proposta de revisão e embasar o desenvolvimento da estratégia de busca por trabalhos científicos, optou-se pela realização de uma breve análise bibliométrica sobre a palavras-chave *Weigh-in-Motion* e seus termos correlatos, com o objetivo de compreender, de forma macro, as diferentes áreas de pesquisa em torno desse tema e como os conceitos relacionados a Mineração de Dados se encaixam nesse campo de pesquisa.

3.2.1 Análise bibliométrica da pesquisa em Pesagem em Movimento

A presente seção descreve a elaboração de uma breve análise bibliométrica, realizada com o intuito de promover o nível de compreensão sobre as principais áreas de pesquisa e aplicações práticas envolvendo o tema Pesagem em Movimento, *Weigh-in-Motion* (WIM). Assim, a análise buscou a obtenção de percepções sobre as áreas-chave de pesquisa dos temas em questão, para auxiliar a elaboração de uma proposta de revisão coerente com os objetivos traçados para o trabalho.

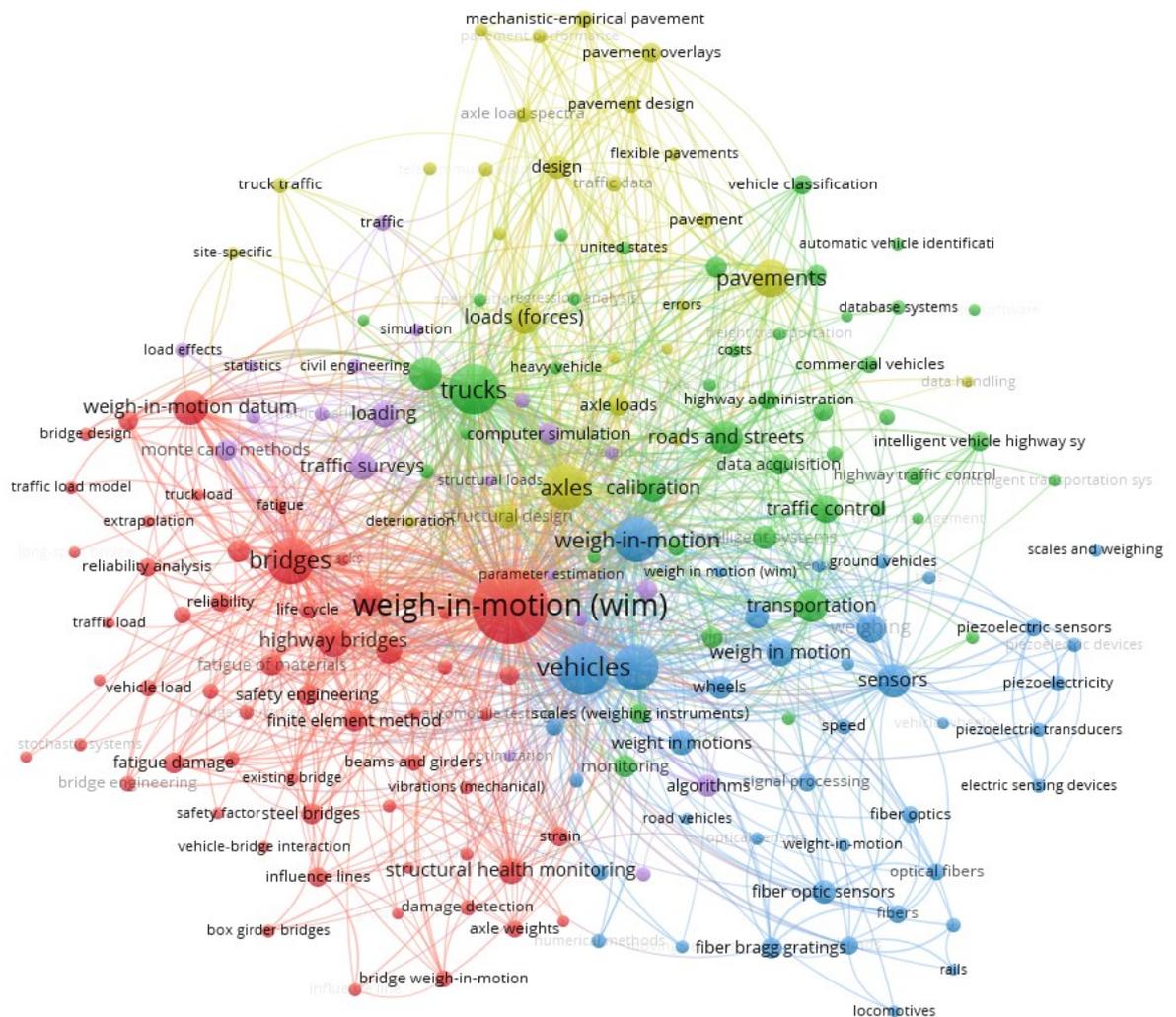
Primeiramente, realizou-se uma pesquisa de artigos na base de trabalhos Scopus com a palavra-chave “*Weigh-in-Motion*”, para que fossem retornados todos os trabalhos nos quais este termo aparece, considerando o conteúdo dos títulos, resumos e lista de palavras-chave. A consulta retornou um total de 1028 trabalhos.

A análise da co-ocorrência de palavras-chave dos trabalhos permite que sejam observadas tendências entre os tópicos de maior frequência sobre os quais os trabalhos são produzidos. Para gerar essa análise, foi utilizado o software VOSViewer, que permite a

importação das informações dos trabalhos de uma base inteira e realiza o processamento dessas informações de forma a criar gráficos multidimensionais com as palavras-chave encontradas nesses trabalhos.

O gráfico gerado com as palavras-chave de maior frequência entre os 1028 trabalhos selecionados é mostrado na Figura 20. Para limitar o tamanho e garantir a clareza do gráfico criado, apenas os termos que apareceram mais de 15 vezes foram considerados.

Figura 20 – Análise das palavras-chave de maior frequência entre 1028 trabalhos de pesagem em movimento (Weigh-in-Motion) selecionados



Fonte: Autor, produzido com a ferramenta VOSViewer (2021)

O gráfico da Figura 20 permite compreender de forma geral, como se distribuem as áreas de pesquisa relacionadas à pesagem em movimento, de forma a facilitar a navegação sobre os artigos e acelerar a definição da relevância de cada trabalho para o presente trabalho. Na

representação gerada, o tamanho dos círculos e da fonte estão relacionados à quantidade de vezes que uma palavra-chave ocorre. Já a distância entre as diferentes palavras-chave e as linhas no gráfico estão relacionados à familiaridade entre os diferentes termos. Assim, quanto mais próximos no gráfico, maiores são as chances dessas palavras-chave ocorrerem em um mesmo trabalho. Por fim, a relação de proximidade entre palavras-chave culmina na divisão de *Clusters* (agrupamentos), que são representados por cores.

Na Figura 20, a divisão dos clusters permite sugerir também uma classificação entre os tipos de trabalhos que envolvem a pesagem em movimento. Assim, com a cor amarela, observa-se a predominância de palavras-chave que se relacionam com as áreas pavimento e infraestrutura viária. Nesse sentido, a tradução das palavras que aparecem com mais frequência são: “eixos”, “pavimentos”, “carga (força)” e “projeto”.

No agrupamento vermelho é possível observar uma predominância de palavras-chave relacionadas à aplicação da pesagem em movimento para pontes. Neste grupo, as palavras-chave com maior ocorrência são (em português): “pesagem em movimento (WIM)”, “pontes”, “pontes rodoviárias”, “dados de pesagem em movimento”, “manutenção” e “monitoramento de integridade estrutural”. Trata-se do cluster com maior ocorrência de palavras-chave interrelacionadas.

No agrupamento azul, encontram-se palavras-chave relacionadas a sensores de pesagem em movimento e o processo de pesagem em si. Os termos de maior ocorrência são: “veículos”, “pesagem em movimento”, “sensores”, “pesagem”, “sistemas de pesagem em movimento”, “cargas dinâmicas”. Ainda, estão em azul uma gama de palavras-chave relacionadas a variados tipos e tecnologias de sensores WIM.

Com a cor verde, observa-se a predominância de termos relacionados à gestão e operação de sistemas de transporte viário. Neste grupo, as palavras-chave de maior ocorrência são: “caminhões”, “rodovias” e “ruas”, “automóveis”, “transporte”, “controle de tráfego” e “sistemas inteligentes”.

Por fim, com a cor roxa, observa-se a existência de um agrupamento cujas palavras-chave possuem relação com estudos de tráfego e aplicação de métodos estatísticos a partir de dados de sistemas WIM. Nesse *cluster*, as palavras-chave com maior ocorrência são: “pesquisa de tráfego”, “carregamentos”, “simulação computacional”, “algoritmos”, “métodos de monte carlo” e “modelos matemáticos”.

A análise bibliométrica realizada permitiu a obtenção de perspectivas que contribuem para uma maior precisão da revisão bibliográfica a ser realizada. Com base na interpretação das

palavras-chave, os trabalhos que tratam da Pesagem em Movimento podem ser agrupados em até cinco áreas distintas, conforme demonstra a divisão por *clusters* realizada.

O agrupamento com a cor roxa é onde melhor se encaixa o tipo de trabalho que está sendo proposto na presente dissertação. Na representação gráfica gerada, verifica-se que esse *cluster* possui pontos dispersos por todo o gráfico, o que pode ser interpretado como uma característica do tema, já que o tratamento e processamento de dados e a utilização de técnicas derivadas da estatística é algo aplicável a praticamente a todas as áreas de pesquisa da pesagem em movimento.

3.3 ETAPA 2 - ELABORAR A PROPOSTA DA REVISÃO

A presente revisão bibliográfica sistemática se propõe a identificar trabalhos que usem mineração de dados, ou conceitos relacionados, para extração de informações relevantes sobre o excesso de peso de veículos. Para isso serão consideradas as seguintes premissas para a elaboração da estratégia de busca:

- Os trabalhos devem tratar do tema pesagem em movimento. Portanto, a busca deve considerar a obrigatoriedade palavra “*weigh-in-motion*” ou uma de suas variantes, no título ou no resumo.
- Os trabalhos devem conter a aplicação de técnicas relacionadas ao conceito de mineração de dados. Portanto, o trabalho deve conter ao menos uma das seguintes palavras-chave: “*data mining*” ou “*machine learning*” ou “*knowledge*”.
- Os trabalhos devem abordar o tratamento de dados de excesso de peso de veículos. Portanto, será considerada obrigatório a presença da palavra “*overload*” ou uma de suas variantes, no título ou nos resumos dos trabalhos selecionados para análise.

Cabe ressaltar que os trabalhos selecionados para revisão devem abordar a aplicação da mineração de dados (*data mining*) para extração de conhecimentos de bases de dados HS-WIM. Portanto, não serão considerados para estudo e análise os trabalhos que abordam a mineração de dados, ou outros conceitos correlatos, especificamente para a apoio aos processos de medição de cargas.

3.4 ETAPA 3 - DESENVOLVER O PROTOCOLO DA REVISÃO

A definição do protocolo de revisão foi realizada com base na seguinte sequência de quatro subprocessos:

- Definição das fontes de dados a serem utilizadas no levantamento;
- Definição das palavras chaves e das respectivas combinações de palavras-chave a serem utilizadas no levantamento;
- Definição dos critérios para seleção de trabalhos para análise;

O protocolo de revisão foi aplicado sobre o tema *Pesagem em Movimento*, *Weigh-in-Motion* (WIM). A aplicação da sequência previamente descrita resultou no seguinte protocolo de revisão:

- Primeiramente, foi definido que a busca por trabalhos se limitaria à base de trabalhos Scopus, um dos bancos de dados de trabalhos científicos de mais elevada reputação, que abrange os principais periódicos de engenharia e de outras áreas correlatas.
- A estratégia de busca, através de palavras-chave, foi definida com base nas premissas elencadas na etapa 2 do processo de revisão. Assim, definiu-se que a busca por trabalhos seria realizada com base na seguinte *string* de palavras-chave: ("weigh*-in-motion") AND ("data mining" OR "machine learning" OR "knowledge")
- Para o processo de seleção de trabalhos científicos para análise e documentação, foram definidos os seguintes critérios:
- O trabalho deve abordar uma técnica, cientificamente embasada, para extração de informações a partir de bases de dados de pesagem em movimento em alta velocidade (HS-WIM)
- O trabalho deve tratar da coleta de dados por meio de sistemas HS-WIM, sendo essa coleta realizada de forma ininterrupta e sobre o tráfego real de uma rodovia.
- A técnica de análise de dados abordada no trabalho deve ser aplicada sobre registros de tráfego de veículos, coletados ininterruptamente, provendo uma forma de interpretação e de extração de conhecimentos a partir desse tipo de informação.
- Com o intuito de complementar a estratégia de busca realizada, optou por executar uma busca adicional, pela plataforma *Google Acadêmico*, com as palavras-chave

“*weigh-in-motion*” e “*data mining*”. Essa busca tem como objetivo assegurar que não há trabalhos de relevância científica, que associam esses dois temas, que por ventura não tenham sido identificados na busca anterior.

3.5 ETAPA 4 - IDENTIFICAR E SELECIONAR OS TRABALHOS

Os trabalhos foram identificados e selecionados de acordo os critérios descritos no Protocolo da Revisão. Nesse contexto, um total de 72 artigos foram selecionados para posterior análise. No entanto, alguns trabalhos foram encontrados em fontes distintas. Desconsiderando essas duplicidades, chegou-se ao total de 65 trabalhos.

3.6 ETAPA 5 - AVALIAR OS TRABALHOS SELECIONADOS

Os trabalhos selecionados foram avaliados com o objetivo de confirmar o atendimento aos critérios de seleção estabelecidos e a sua relevância para a presente dissertação. Essa etapa do processo de revisão envolveu a análise dos 65 trabalhos previamente selecionados. Este processo foi realizado com base na leitura dos títulos e dos resumos dos trabalhos obtidos e quando necessário, foram analisados trabalhos na íntegra e também elementos isolados no corpo dos artigos, buscando uma maior compreensão sobre os temas abordados. Como resultado desse processo, dos 65 trabalhos previamente selecionados, 21 foram considerados para inclusão na presente dissertação.

3.7 ETAPA 6 - EXTRAIR DADOS E INFORMAÇÕES

A partir da leitura dos trabalhos selecionado, foram extraídas ideias e informações relevantes para a dissertação como um todo e para o embasamento técnico e teórico do método proposto. Assim, a extração de dados e informações dos artigos foi feita com base nos seguintes objetivos específicos:

- Possibilitar uma documentação consistente do estado arte no que diz respeito à utilização de técnicas de Mineração de Dados para extração de conhecimentos de bases de dados HS-WIM

- Identificar ideias e técnicas relevantes para o processamento de dados HS-WIM, com potencial de apoiar a extração de conhecimentos relevantes para o aprimoramento do controle do excesso de peso
- Identificar ideias e técnicas de análise de dados contendo elementos visuais que facilitarão a interpretação dos índices de excesso de peso registrados pelo sistema. Essa busca é relevante pois o método que se deseja construir tem como intuito facilitar as tomadas de decisão sobre o controle do excesso de peso, por profissionais que atuam na área.

A partir do estudo dos artigos selecionados, buscou-se obter contexto sobre o estado da arte e embasar tecnicamente a contribuição proposta na presente dissertação. Assim, o estudo e a documentação referente aos trabalhos estudados foram feitos em sequência cronológica, visando à compreensão sobre a evolução do estado da arte ao longo dos anos. Com a extração dos dados e informações no escopo supracitado, os trabalhos foram sintetizados para posterior documentação dos resultados da revisão.

3.8 ETAPA 7 - SINTETIZAR OS DADOS

Os 21 trabalhos selecionados para inclusão na dissertação foram sintetizados em função dos sua área de pesquisa e do seu tipo de conteúdo. Nesse contexto, os trabalhos selecionados são resumidos e mostrado no Quadro 2.

Quadro 2 – Matriz para priorização dos recursos.

Título	Autor(es)	Ano	Categoria/Aplicação
Site-specific truck loads on bridges and roads	Laman, J.A., Nowak, A.S.	1997	Pontes
Data mining to produce truck traffic inputs for mechanistic-empirical pavement design	Jablonski, B., Regehr, J.D., Kass, S., Montufar, J.	2010	Pavimentos
Axle load distribution for Mechanistic-Empirical Pavement Design in North Carolina	Sayyady, F., Stone, J.R., List, G.F., (...), Richard Kim, Y., Sajjadi, S.	2011	Pavimentos
Mechanistic-empirical pavement design guide (MEPDG): a bird's-eye view	Li, Q., Xiao, D.X., Wang, K.C.P., Hall, K.D., Qiu, Y.	2011	Pavimentos
Speed characteristics on Manitoba's National Highway System roads using weigh-in-motion data	MacAngus, J., Milligan, C., Montufar, J., Belluz, L.	2012	Estudos de tráfego (análise da velocidade operacional)
Applying weigh-in-motion traffic data to reliability-based assessment of bridge structures	Zhou, X., Schmidt, F., Toutlemonde, F., Jacob, B.	2013	Pontes
Procedure for statistical categorization of overweight vehicles in a wim database	Fiorillo, G., Ghosn, M.	2014	Estudos de tráfego diversos (projeto de pneus)
Estimating characteristic bridge traffic load effects using Bayesian statistics	Leahy, C., Obrien, E.J., Enright, B., Power, R.	2015	Pontes
Truck body configuration volume and weight distribution estimation by using weigh-in-motion data	Hyun, K., Hernandez, S., Tok, A., Ritchie, S.G.	2015	Estudos de tráfego diversos (caracterização do tráfego)
Development of simplified traffic loading for secondary road pavement design	Li, Q.J., Wang, K.C.P., Qiu, S., Zhang, Z.D., Moravec, M.	2015	Pavimentos
Automated data-driven load estimation of highway bridges using structural monitoring data	Zhang, Y., O'Connor, S.M., Lynch, J.P.	2015	Pontes

Título	Autor(es)	Ano	Categoria/Aplicação
Large-scale hybrid Bayesian network for traffic load modeling from weigh-in-motion system data	Morales-Nápoles, O., Steenbergen, R.D.J.M.	2015	Pontes
Investigation of Truck Weights and Dimensions Using WIM Data	Schmidt, F., Jacob, B., Domprobst, F.	2016	Estudos de tráfego (projeto de pneus)
Development of site-specific live load models for bridge condition assessment based on Long-Term SHM Data	Xia, Y., Ni, Y.	2016	Pontes
Statistical Investigation of Truck Type Distribution on Cold Region Highways During Winter Months	Roh, H.-J., Sahu, P.K., Sharma, S., Mehran, B.	2018	Estudos de tráfego (caracterização do tráfego)
Detect and charge: Machine learning based fully data-driven framework for computing overweight vehicle fee for bridges	Gungor, O.E., Al-Qadi, I.L., Mann, J.	2018	Pontes
Structural health monitoring of existing bridges using bridge weigh-in-motion measurements - Value of information analysis	Skokandić, D., Mandić Ivanković, A., Žnidarič, A.	2018	Pontes
Traffic inputs for pavement ME design using Oklahoma data	Li, Q.J., Minnekanti, S.P., Yang, G., Wang, C.	2019	Pavimentos
Use of regression trees to predict overweight trucks from historical weigh-in-motion data	Bosso, M., Vasconcelos, K.L., Ho, L.L., Bernucci, L.L.B.	2019	Controle do excesso de peso
Predicting fatigue damage of highway suspension bridge hangers using weigh-in-motion data and machine learning	Deng, Y., Zhang, M., Feng, D.-M., Li, A.-Q.	2020	Pontes
A systematic approach to estimating traffic load effects on bridges using weigh-in-motion data	Sjaarda, M., Meystre, T., Nussbaumer, A., Hirt, M.A.	2020	Pontes

Fonte: Autor (2020)

Verifica-se que, entre os trabalhos selecionados para análise, com base no escopo delimitado, há duas áreas de estudo predominantes: pontes e pavimentos. Essa observação está coerente com o que foi identificado na análise bibliométrica sobre todos os trabalhos que envolvem a pesagem em movimento como um todo (capítulo 3.2.1), em que os *Clusters* com maior incidência de palavras-chave envolviam exatamente essas duas áreas. Por fim, com base na síntese dos trabalhos selecionados, foram estruturadas as etapas 8 e 9, que tratam da elaboração do relatório do processo e da apresentação dos resultados e conclusões.

3.9 ETAPA 8 – ELABORAR RELATÓRIO DO PROCESSO

O estudo detalhado dos trabalhos selecionados indicou que a documentação científica sobre aplicação de conceitos e técnicas de mineração de dados sobre dados de sistemas HS-WIM pode ser subdividida em três categorias, sendo essas:

- Projeto e avaliação de pontes.
- Projeto e gerência de pavimentos.
- Estudos de tráfego diversos.

A categoria “estudos de tráfego diversos” inclui múltiplas abordagens de estudos que visam compreender as características do tráfego de um local ou de um sistema viário e não se enquadram nas outras duas categorias (pavimentos e pontes). Estão inclusos nessa categoria os estudos voltados para o controle do excesso de peso, que compõe o tema central da presente dissertação.

3.9.1 Mineração de dados HS-WIM para projeto e avaliação de pontes

Os trabalhos selecionados e descritos na presente seção envolvem a utilização de bases de dados HS-WIM para a obtenção de informações de tráfego que embasam o projeto de pontes a avaliação do seu comportamento frente às demandas de carga ou a estimativa das demandas de carga ao longo do tempo. Nesse contexto, o estudo desses artigos contribuiu com ideias e informações sobre diferentes formas de se processar e de se visualizar grandes quantidades de dados HS-WIM para obtenção de conhecimentos sobre o tráfego viário.

O trabalho de Laman e Nowak (1997) foi o trabalho mais antigo selecionado para análise. Esse estudo aponta para a necessidade de identificação das variações específicas de

cada local de onde são extraídas as informações para estimar a carga viva de pontes, o que pode ser feito através de sistemas de pesagem em movimento em alta velocidade (HS-WIM). Os resultados desse estudo demonstram, a partir da extração de conhecimentos de bases de dados HS-WIM, que os índices de carga variam significativamente entre diferentes locais de uma mesma rede viária, o que demanda que os projetos sejam feitos com dados de carga específicos de cada local, para que não seja necessário um superdimensionamento.

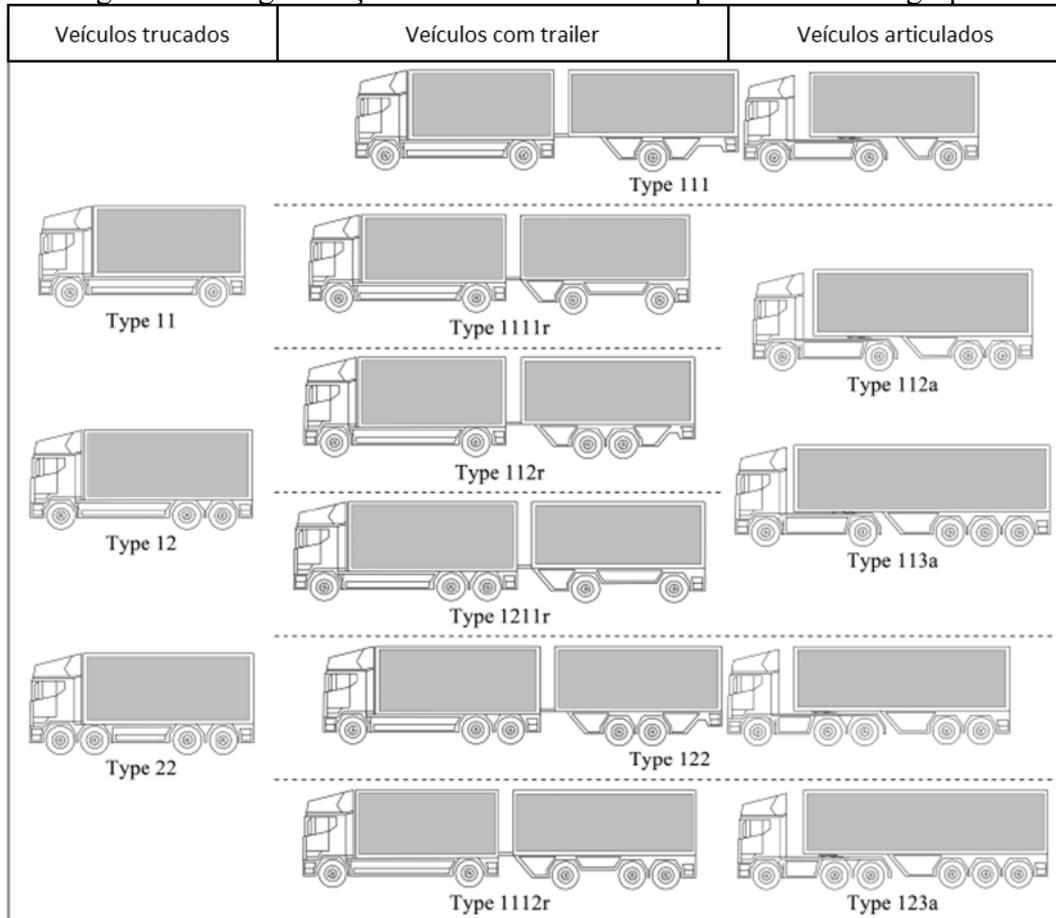
Já na década de 2000, Sivakumar et al. (2007) discutiram o possível aprimoramento dos procedimentos de determinação das cargas vivas de pontes e dos fatores de carga usando dados de sistemas WIM, enquanto Zhou et al. (2013) utilizaram sistemas WIM para investigar o impacto real da carga exercida pelo tráfego nas condições de uma ponte ao longo do tempo. Nesse sentido, o desenvolvimento tecnológico e a popularização do uso de sistemas WIM abriram um novo leque de possibilidades para o projeto e para a avaliação de pontes, no que diz respeito à possibilidade de obtenção de informações detalhadas e específicas sobre as cargas do tráfego.

Dentro do escopo da revisão realizada, a partir de 2015 os termos “*Data Mining*” e “*Machine Learning*” passaram a ser introduzidos em trabalhos envolvendo a extração de conhecimentos para projetos e avaliação de pontes, a partir do processamento e análise de dados de pesagem em movimento. Nesse contexto, o trabalho de Zhang et al. (2015) apresenta um método para estimativa das cargas em pontes, utilizando técnicas de aprendizado de máquina sobre dados de WIM, associados ao monitoramento, em tempo real, das respostas das pontes. Leahy et al. (2015) realizam uma simulação para estimativa de cargas sobre pontes em um horizonte de 75 anos, utilizando a técnica de Atualização Bayesiana para associar o conhecimento extraído de um banco de dados HS-WIM com 81,6 milhões de registros de veículos, de 19 locais nos Estados Unidos, com novos dados de amostra.

Por fim, no artigo de Morales-Nápoles e Steenbergen (2015), foi demonstrado o potencial de Redes Bayesianas para modelar os dados de sistemas de pesagem em movimento, visando à sua aplicação no projeto de pontes. O processo de quantificação demonstrado fornece informações sobre o acúmulo estimado da carga de tráfego, provendo um modelo para expansão dos dados fornecidos por sistemas HS-WIM, para uso no projeto de pontes. Já no campo da avaliação de pontes existentes, os trabalhos de Deng et al. (2020) e Sjaarda et al. (2020) apresentam o uso de técnicas relacionadas a mineração de dados para estabelecer os modelos de regressão entre os danos diários por fadiga e os parâmetros de carga de tráfego coletados por sistemas HS-WIM, sem a necessidade de instrumentação específica. Na análise das técnicas

empregadas, o trabalho de Sjaarda et al. (2020) forneceu ideais relevantes para a presente dissertação, com um método segmentação de veículos pesados em três grupos, conforme demonstra a Figura 21.

Figura 21 – Segmentação de classes de veículos pesados em três grupos.



Fonte: Adaptado de Sjaarda et al. (2020)

Assim, o estado da arte no que diz respeito à utilização de conceitos de mineração de dados, na extração de conhecimentos de bases de dados HS-WIM, visando o projeto e a avaliação de pontes, passou a focar no desenvolvimento de modelos preditivos para cargas sobre pontes. Esses modelos visam identificar as características de tráfego atuais e futuras a partir do processamento de dados HS-WIM.

Na presente revisão sistemática, há uma parcela significativa de trabalhos que demonstram a aplicação de técnicas relacionadas a Mineração de Dados (*Data Mining*) e/ou Aprendizado de Máquina (*Machine Learning*), que visam a aplicação de dados WIM para apoio a projetos e cálculos pontuais ou preditivos de fadiga em pontes. Mesmo que esses trabalhos

não abordem técnicas de processamento e visualização de dados HS-WIM para fins de aprimoramento do controle do excesso de peso, que é o tema central da presente dissertação, o estudo desses artigos possibilitou a obtenção de uma visão mais abrangente sobre diferentes formas de se processar dados HS-WIM para extração de conhecimento sobre o tráfego viário.

3.9.2 Mineração de dados HS-WIM para projeto e gerência de pavimentos

A gradual introdução do Guia de Dimensionamento Mecânico-Empírico de Pavimentos (do inglês *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide* - MEPDG), nos Estados Unidos, culminou em uma série de desafios às agências rodoviárias e seus respectivos projetistas, uma vez que o dimensionamento de pavimentos passou a requerer uma gama maior e mais complexa de informações de entrada, relacionadas ao tráfego, ao clima, à estrutura do pavimento e às propriedades dos materiais (LI et al., 2011). Nesse contexto, mais especificamente para as entradas de tráfego, ao invés de utilizar o conceito conhecido como Carga por Eixo Padrão Equivalente (*Equivalent Single Axle Load* - ESAL) para caracterização do tráfego, o MEPDG requer informações detalhadas do espectro de cargas, considerando a existência de técnicas e tecnologias (como a pesagem em movimento) que permitem a obtenção desses dados de forma precisa. Assim, por consequência dessa demanda, uma quantidade relevante de trabalhos envolvendo a aplicação de conceitos de mineração de dados sobre bases de dados HS-WIM foram desenvolvidos na última década, visando trazer soluções para a plena implementação do MEPDG.

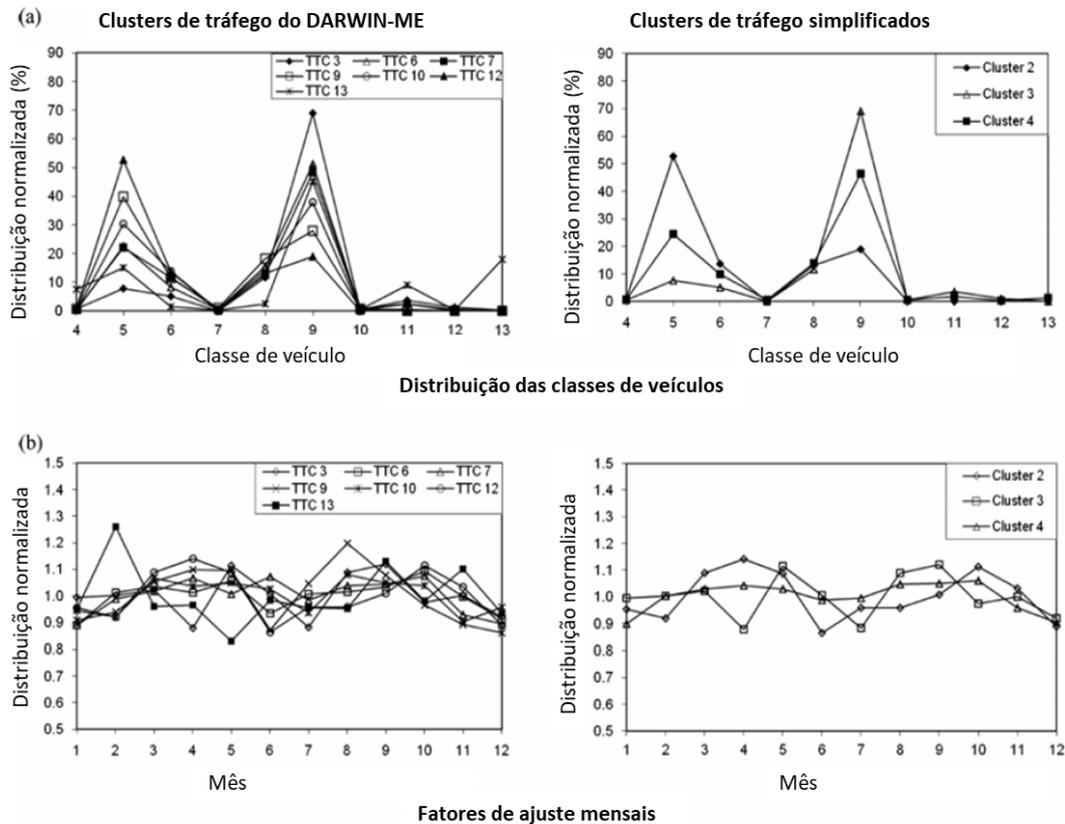
O artigo de Jablonski et al. (2010) retrata um exemplo de trabalho no qual técnicas relacionadas a Mineração de Dados foram usadas sobre bases de dados HS-WIM para a produção de entradas para o dimensionamento mecânico-empírico de pavimentos nessa região. Nesse contexto, foram aplicadas duas técnicas de mineração de dados, sobre bases de dados HS-WIM de rodovias da província de Manitoba, Canadá: análises de cluster e algoritmos de decisão. A aplicação dessas técnicas viabilizou a produção de informações de tráfego regionais (padrões regionais) e específicas de local (*site-specific*), necessárias para o dimensionamento de pavimento segundo orientações do MEPDG. As técnicas desenvolvidas permitem que os padrões regionais sejam utilizados para a obtenção de estimativas de tráfego em locais onde os dados específicos não existem, enquanto as informações específicas de local são utilizadas diretamente para a sua área de influência.

O trabalho de Sayyady et al. (2011) demonstra uma abordagem de agrupamento (*clustering*) multidimensional para criação de padrões regionais de distribuição de carga por eixo (referidos no trabalho como “fatores médios regionais”), que são utilizados como segundo nível de *input* (em termos de nível de detalhe e especificidade) na aplicação do Guia de Dimensionamento Mecânico-Empírico de Pavimentos (MEPDG). O nível 2 de entrada de tráfego deve ser adotado quando não há disponibilidade de informações detalhadas, de qualidade, específicas para local do projeto (nível 1). Conforme apontado pelos autores desse artigo, o processamento de dados de pesagem para a obtenção do nível 2 de entrada de tráfego acaba sendo um dos principais desafios desse método de dimensionamento, já que nesses casos é necessário associar dados de carga “regionais”, com dados de contagem específicos do local de projeto.

Ainda no contexto do dimensionamento mecânico-empírico de pavimentos, o trabalho de Li et al. (2015) trata do desenvolvimento de um método simplificado para estimativa das cargas do tráfego em rodovias secundárias, que representam cerca 70% do total de rodovias, mas apenas 15% do tráfego total. Segundo os autores, apesar de possuírem um volume de tráfego relativamente baixo, essas rodovias tendem a apresentar níveis significativos de veículos pesados que servem à indústria e à agricultura e geralmente não possuem dados de carga disponíveis. Neste artigo, o algoritmo de cluster K-means é aplicado para identificar grupos de sistemas HS-WIM em operação que coletaram dados de tráfego (e de carga) similares, no que diz respeito às entradas do MEPDG. A partir desses grupos, foi criado um modelo simplificado para estimar as distribuições de carga, inclusive em locais onde não há contagem classificatória, considerando o conhecimento prático sobre as características do tráfego local.

A Figura 22 demonstra, de forma gráfica, a abordagem do trabalho de Li et al. (2015), no qual a execução de uma técnica de *clustering* permitiu a simplificação dos grupos de tráfego padrão do software de dimensionamento de pavimentos, facilitando a tomada de decisão em locais com deficiência de dados de tráfego.

Figura 22 – Simplificação dos grupos de tráfego padrão para classificação de segmentos.



Fonte: Adaptado de Li et al. (2015)

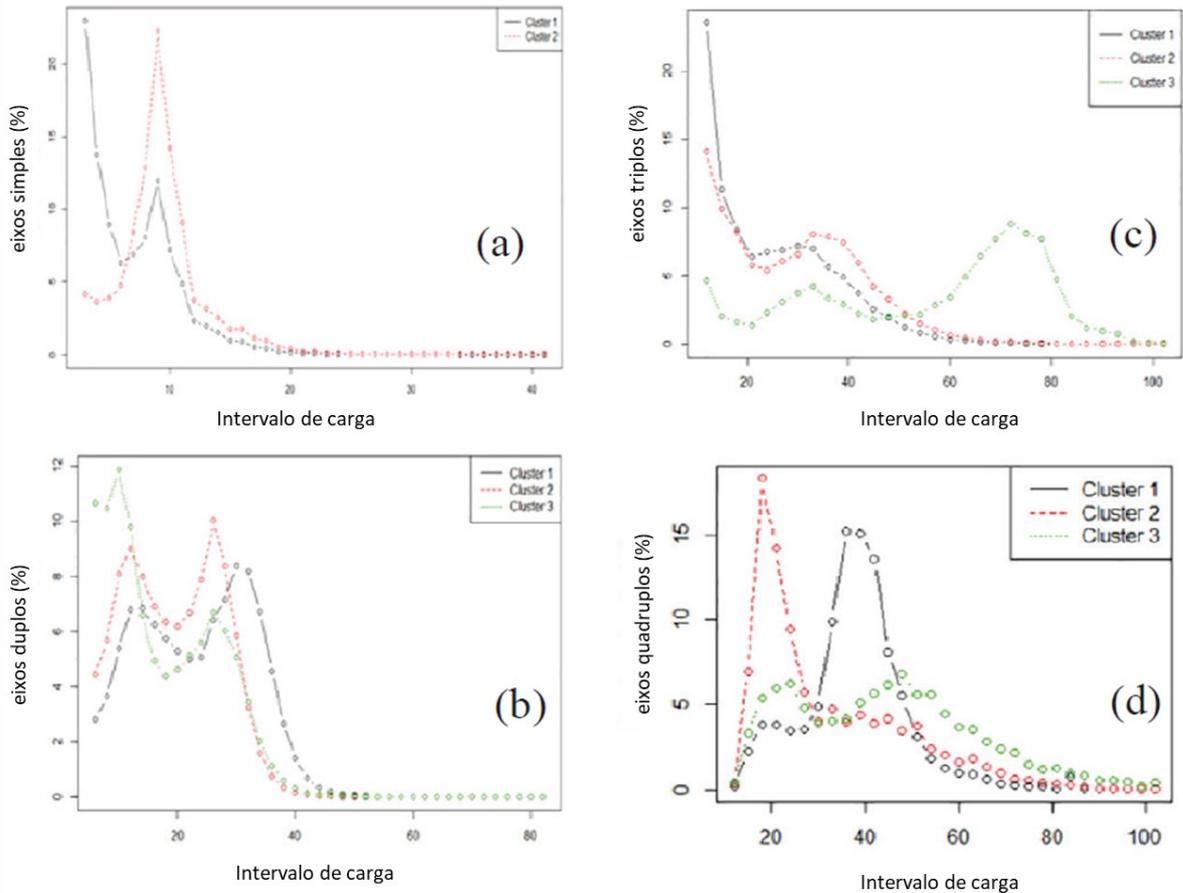
Conforme mostrado na Figura 22, a análise de *cluster* realizada possibilitou simplificar a quantidade de agrupamentos de tráfego para uma quantidade otimizada, tonando mais fácil a tomada de decisão com base em conhecimentos subjetivos do tráfego, por analistas que conhecem as rodovias de interesse. Com os grupos fornecidos pelo software, a tomada de decisão só poderia ser tomada com base em dados de nível 1, coletados especificamente no local de projeto.

Mais recentemente, Li et al. (2019) desenvolveu um trabalho muito similar ao acima relatado, porém visando a geração de entradas de tráfego para o dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos no estado de Oklahoma, Estados Unidos. Nesse contexto, através da utilização de quatro anos de coleta de dados de pesagem em movimento (WIM) e mais três anos (subsequentes aos dados de WIM) de dados de classificação veicular de diversos locais em Oklahoma, a técnica de *clustering* K-means é aplicada para desenvolvimento dos grupos homogêneos para cada entrada de tráfego do software de dimensionamento Pavement-ME. Por

fim, é desenvolvido um modelo de árvore de decisão para a seleção dos clusters de tráfego apropriados para cada condição local de projeto.

Os gráficos da Figura 23 apresenta o resultado do processo de *clustering* de segmentos viários de Oklahoma, realizado em função dos espectros de carga por eixo/grupo de eixos de veículos pesados, através do qual foram criados dois ou três agrupamentos (*clusters*) distintos para cada tipo de eixo/grupo de eixos da frota dos Estados Unidos.

Figura 23 – Produção de *clusters* de cargas do tráfego.



Fonte: Adaptado de Li et al. (2019)

No lado esquerdo da Figura 23, verifica-se que, no gráfico “a” (eixos simples), o *Cluster 1* consiste de locais com alta proporção de eixos leves (vazios), enquanto o *Cluster 2* contém uma parcela maior de eixos simples carregados. No gráfico “b” (eixos duplos), o *Cluster 3* possui uma predominância de eixos vazios; o *Cluster 2* possui dois picos aproximadamente equivalentes de eixos cheios e vazios; e o *Cluster 3* é similar ao *Cluster 2*, mas com uma frota de veículos mais pesados.

No lado direito da Figura 23, no gráfico “c” (eixos triplos), é possível observar que o *Cluster 1* possui uma predominância de eixos vazios; o *Cluster 2* indica a presença majoritárias de eixos vazios e eixos parcialmente cheios; e o no *Cluster 3* há uma parcela significativa de veículos pesados, provavelmente com carga máxima. No gráfico “d”, o *Cluster 1* possui uma proporção significativa de eixos quádruplos parcialmente carregados, o *Cluster 2* envolve uma maior parcela de eixos leves; enquanto o *Cluster 3* possui quantidades significativas em ambos eixos leves e pesados.

Com base na interpretação dos artigos tratados nesta seção, verifica-se que há uma diferença central de abordagem sobre os dados de carga, coletados por sistemas HS-WIM quando eles são utilizados para fins de projeto e gerência de pavimentos, em comparação com as aplicações voltadas ao controle do excesso de peso: enquanto as análises voltadas para pavimentos possuem foco na carga e no respectivos eixos de veículos que exercem essa carga, os estudos voltados para controle do sobrepeso possuem uma visão mais abrangente, com enfoque sobre o veículo como um todo e sobre a infração de trânsito/transporte cometida. Nesse sentido, é comum que o processamento de dados HS-WIM para fins de apoio ao dimensionamento ou à gerência de pavimentos tenha uma abordagem mais especificamente voltada para as distribuições de cargas por eixo, enquanto as análises na área do controle do sobrepeso exigem que essas cargas por eixos sejam associadas aos respectivos registros de veículos, que além de excederem os limites de peso por eixo, também podem cometer outras infrações relacionadas.

Os métodos utilizados para geração das entradas de tráfego necessárias ao MEPDG também possuem potencial para viabilizar a obtenção informações relevantes para o controle do excesso de peso de veículos. Nesse sentido, observa-se que, da mesma forma que é possível usar bases de dados HS-WIM extrair conhecimentos sobre o tráfego de veículos pesados, a ponto de poder estimar, com certo nível de precisão, as frequências de carga de locais onde não há qualquer tipo de coleta de dados de tráfego, é provável que seja possível fazer esse mesmo tipo de estimativa em relação ao tráfego de veículos de sobrepeso. Ainda, verificou-se que, do ponto de vista do projeto de pavimentos, a distribuição das classes de veículos pesados, as distribuições temporais e as frequências de carga são atributos relevantes para caracterizar o tráfego de um local.

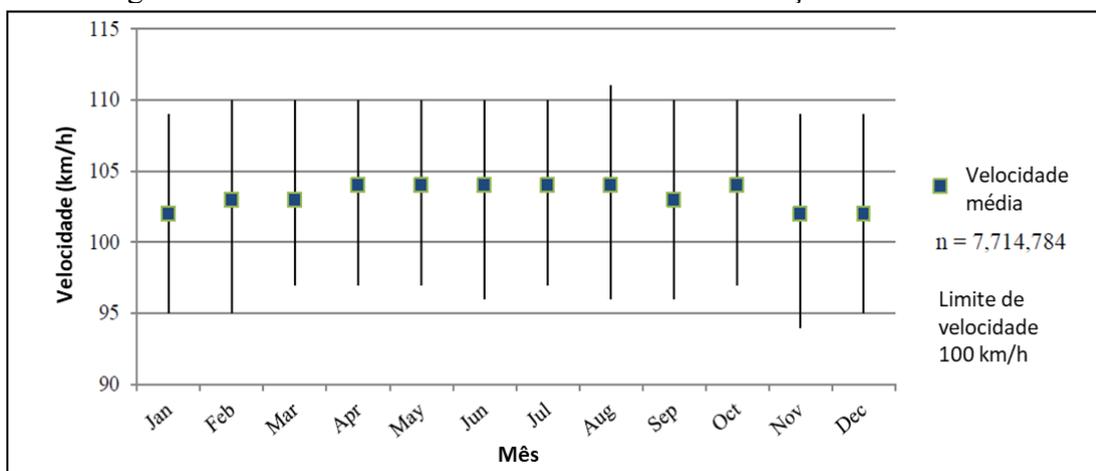
3.9.3 Mineração de dados HS-WIM em estudos de tráfego diversos

Nesta seção estão incluídos os trabalhos nos quais técnicas relacionadas à Mineração de Dados foram aplicadas sobre bases de dados HS-WIM, visando apoiar o processo de compreensão das características do tráfego de um local ou de um sistema viário, mas que não possuem relação específica com o projeto e avaliação de pontes ou com o dimensionamento e gerência de pavimentos, que constituíram as duas seções anteriores. Assim, estão inclusos nessa categoria os estudos voltados para o controle do excesso de peso, que compõe o tema central da presente dissertação.

O primeiro trabalho identificado como relevante nesta seção foi documentado por Macangus et al. (2012), no qual são investigadas as características dos índices de velocidade de veículos com base no processamento de dados HS-WIM. A pesquisa teve como objetivo sintetizar o conhecimento existente sobre os fatores externos que influenciam sobre os índices de velocidade de veículos e analisar os dados de velocidade para estimar o real os impactos dos referidos fatores nos índices velocidade. Os dados de velocidade foram obtidos do banco de dados do *Manitoba Highway Traffic Information System* (MHTIS), oriundos de cinco dispositivos de pesagem em movimento (WIM), em operação na província de Manitoba.

A Figura 24 apresenta um dos gráficos produzidos no trabalho de Macangus et al. (2012), contendo uma análise dos índices de velocidade praticado por veículos, em função dos doze meses do ano, em que são ilustrados a velocidade média, além dos intervalos entre os percentis 15 e 85 de cada mês.

Figura 24 – Análise dos índices de velocidade em função do mês do ano.



Fonte: Adaptado de Macangus et al. (2012)

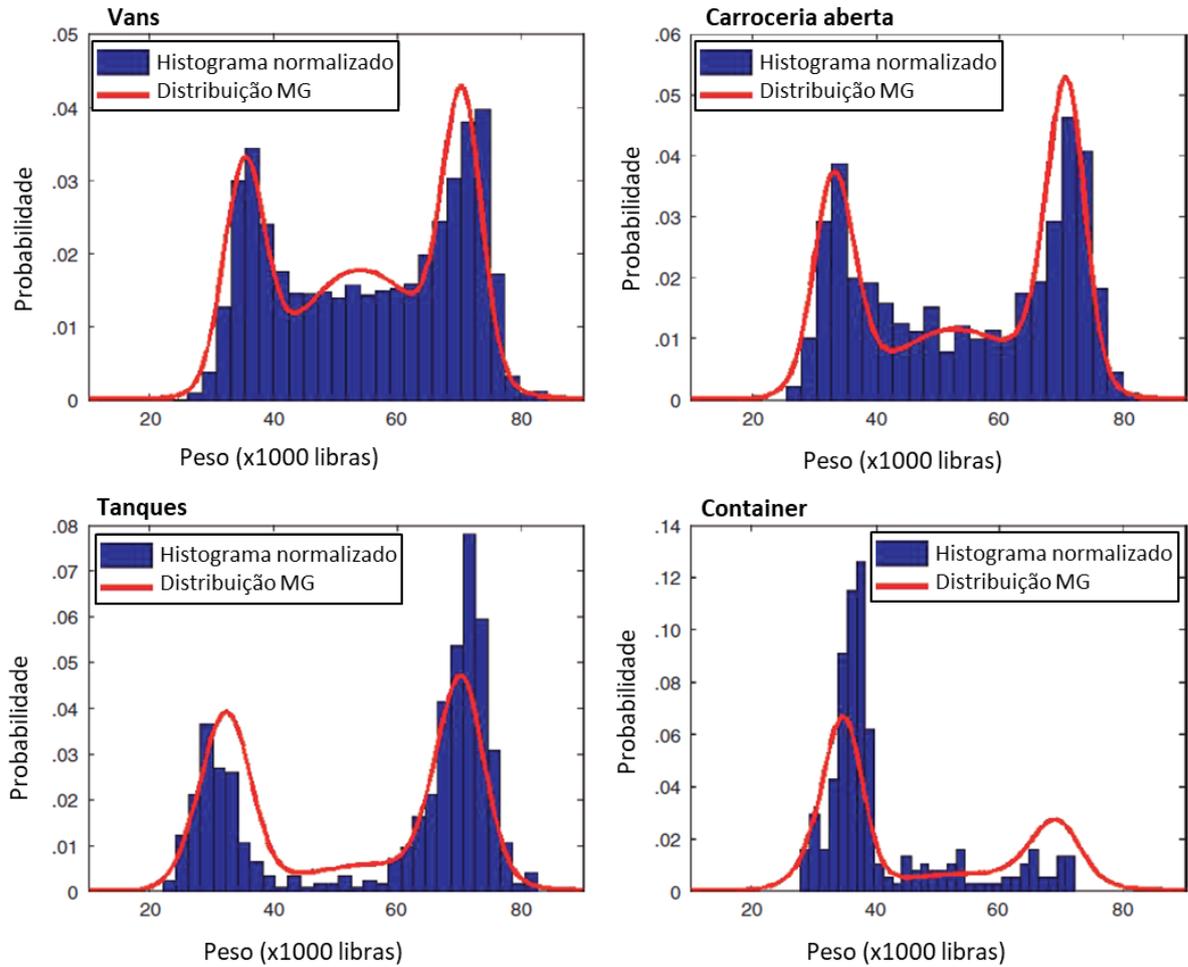
O estudo de fatores relacionados ao tráfego, com influência sobre os índices de velocidade, trouxe ideias sobre como fazer segmentações das classes de veículos e de fatores temporais, além de introduzir de novos atributos potencialmente relevantes para a caracterização do tráfego, principalmente quando a análise é realizada sobre múltiplos locais. Esses fatores são: fatores ambientais (fatores de iluminação e clima) e fatores de engenharia viária (capacidade e classificação da via). Os resultados da análise fornecem uma melhor compreensão do comportamento da velocidade sob diferentes fatores de influência, que também podem ser fatores de influência para a prática do excesso de peso em veículos.

O trabalho de Fiorillo e Ghosn (2014) estabelece um procedimento para categorização estatística de veículos com sobrepeso em uma base de dados HS-WIM do estado de Nova Iorque, Estados Unidos, com o intuito de subsidiar políticas e estratégias de fiscalização do peso de veículos e de autorizações especiais de trânsito. Nesse contexto, todos os registros com excesso no Peso Bruto Total (PBT) foram segmentados em função do tipo de excesso registrado, do comprimento total entre o primeiro e o último eixo (frequentemente referido na literatura internacional como *wheelbase*) e também em função da sua configuração de eixos. A partir dessa segmentação, é aplicado um algoritmo de Mineração de Dados que identifica os veículos passíveis de autorização especial, daqueles que estão definitivamente com carregamento ilegal.

O artigo produzido por Hyun et al. (2015) apresenta um método de segmentação de veículos pesados em função do seu provável tipo de silhueta e um modelo que permite estimar a distribuição dos volumes de tráfego e dos PBTs desses veículos. Nesse trabalho, considerou-se apenas os veículos da classe 3S2, que possui cinco eixos e um é um dos tipos de veículos pesados mais comuns da frota norte americana. A partir da aplicação dos dados HS-WIM sobre uma árvore de decisão é possível verificar a probabilidade de cada registro de veículo ser enquadrado como uma das quatro segmentações desenvolvidas. Já para a estimativa dos PBTs, com o uso de medições do sistema WIM existentes, utilizou-se um Modelo de Mistura Gaussiana para configurar as prováveis frequências de peso de cada um dos nós terminais da árvore de decisão desenvolvida.

A Figura 25 apresenta o histograma e o modelo de distribuição por Mistura Gaussiana, para estimativa do PBT em vans, veículos de carroceria aberta, veículos tanque, e veículos com container.

Figura 25 – Histograma e distribuição do PBT por Mistura Gaussiana.



Fonte: Adaptado de Hyun et al. (2015)

O trabalho desenvolvido por Schmidt et al. (2016) apresenta um estudo realizado com uma grande quantidade de dados de pesagem em movimento (WIM), coletados na rede rodoviária francesa, envolvendo aproximadamente 3 milhões de registros de veículos. Os dados foram coletados por três sistemas de pesagem em movimento em alta velocidade (HS-WIM), ao longo de um ano, e foram analisados em função de 20 classes de veículos distintas, que viriam de acordo com a sua silhueta e configuração de eixos. O estudo envolveu o cálculo estimativo do centro de gravidade das cargas transportadas e a análise da variação da sua abscissa ao longo de cada classe de veículo. Também foram analisadas as distribuições de carga por tipo de eixo e por classe de veículo, que foram modeladas com funções de distribuição de probabilidade gaussiana multimodal.

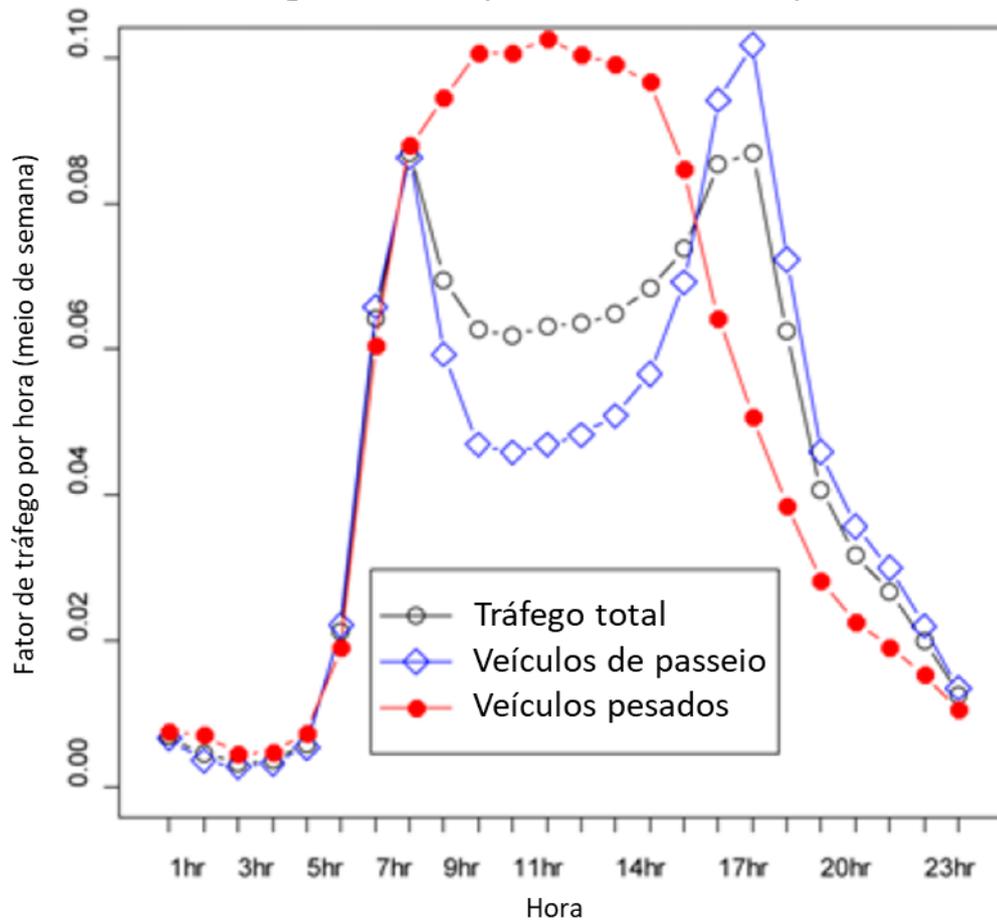
Os resultados obtidos no trabalho de Schmidt et al. (2016) foram utilizados como subsídio para fabricantes de pneus, para uma melhor compreensão sobre as condições de

carregamento de veículos pesados. Ao conhecer os hábitos de carregamento dos veículos, o fabricante pode avaliar a capacidade de carga dos seus produtos, a sua segurança e o seu desempenho em relação ao consumo de combustíveis.

Com uma abordagem também voltada para os diferentes tipos e classificações de veículos pesados, o trabalho relatado por Roh et al. (2018) realiza uma investigação estatística sobre a distribuição dos veículos de carga em rodovias de regiões de clima frio, durante os meses de inverno. Nesse contexto, dois testes estatísticos, mais especificamente o teste do qui-quadrado e o teste de probabilidade binomial, são aplicados para analisar a mudança de distribuição de três classes de veículos durante grandes nevascas e condições de baixa temperatura. A análise sugeriu que a distribuição dos diferentes tipos de caminhão não muda com o início ou o fim da temporada de inverno, nas rodovias regionais de longa distância. Além disso, nenhuma mudança na distribuição dos veículos foi observada ao longo dos diferentes meses de inverno.

Outra questão relevante que o trabalho de Roh et al. (2018) demonstra é que as técnicas de *clustering* documentadas a partir de 2010 para classificação de segmentos viários em função das suas características de tráfego, geram resultados semelhantes aos métodos de classificação de tráfego mais antigos. Ainda, observa-se que o conhecimento específico sobre o tráfego local pode auxiliar na interpretação dos padrões de tráfego, conforme demonstrado a partir da Figura 26.

Figura 26 – Padrão de tráfego classificado por hora do dia, em um ponto de coleta HS-WIM.



Fonte: Adaptado de Roh et al. (2018)

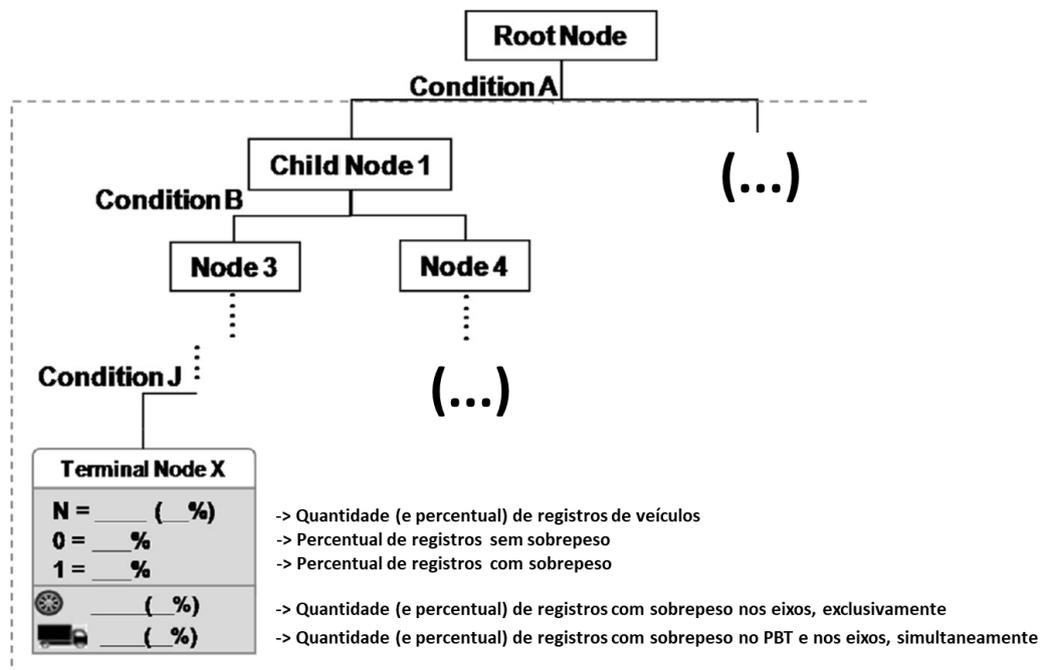
A distribuição de tráfego demonstrada na Figura 26 se refere a um ponto de coleta HS-WIM, que foi inicialmente interpretado uma rota de tráfego para locais de trabalho. Isso ocorreu devido à observação da presença de picos de deslocamento diário, claramente visíveis nos períodos da manhã e da tarde. No entanto, investigações detalhadas das características do tráfego nesse local revelam que, nesta rodovia, o volume de veículos pesados corresponde a 27% do tráfego total, o que se justifica pelo alto índice de transportes de curta distância de areia e cascalho para a região metropolitana de uma grande cidade.

Por fim, o trabalho de Bosso et al. (2019) aborda o uso de árvores de regressão para processamento e segmentação de dados HS-WIM, com o intuito de prever a ocorrência de veículos com excesso de peso. Nesse sentido, aproximadamente 5 meses de coleta de dados HS-WIM, totalizando 515,424 registros de veículos pesados, foram processados e agrupados em função da ocorrência de sobrepeso, da classificação veicular e dos intervalos de tempo em que os registros foram realizados. Como resultado, foram geradas cinco árvores de regressão

distintas, sendo uma para a segmentação dos registros de veículos e outras quatro árvores para análise da distribuição dos tipos de eixos mais comuns da frota. Nessas cinco árvores de regressão, são analisados os índices de excesso no PBT e nos eixos, em função das classes de veículos e dos atributos temporais, permitindo verificar as principais características do sobrepeso local.

Um recorte da explicação das árvores de regressão desenvolvidas por Bosso et al. (2019) é fornecido na Figura 27, juntamente com uma interpretação sobre os campos de informações presentes nos nós terminais da árvore de regressão de registros de sobrepeso.

Figura 27 – Estrutura de árvore de regressão para registros de veículos com excesso de peso.



Fonte: Adaptado de Bosso et al. (2019)

O estudo dos trabalhos presentes nesta seção possibilitou o desenvolvimento ideias sobre como categorizar registros de excesso de peso de veículos, de maneira que facilite a extração de conhecimentos de bases de dados HS-WIM. Dentre os trabalhos selecionados para análise, é predominante a associação dos dados de carga com atributos referentes ao tipo de veículo e aos intervalos temporais, com o intuito de caracterizar o tráfego rodoviário. Assim, é possível inferir que a prática do excesso de peso também pode ser estudada em função desses atributos.

3.10 ETAPA 9 – APRESENTAR RESULTADOS E CONCLUSÕES

A revisão sistemática bibliográfica realizada buscou identificar trabalhos que envolvessem a aplicação de uma grande quantidade de dados de pesagem em movimento para a extração de conhecimentos relevantes para o aprimoramento do controle do excesso de peso de veículos. Com base no objetivo delineado, foi desenvolvida uma estratégia de busca visando identificar os principais trabalhos, publicados no âmbito internacional, nos quais técnicas e conceitos relacionados à mineração de dados fossem aplicados sobre bases de dados HS-WIM.

Considerando-se o contexto apresentado, o processo de estudo e análise dos trabalhos selecionados culminou nas seguintes conclusões e observações, relevantes para o desenvolvimento da presente dissertação:

- As informações sobre a carga de veículos do tráfego são relevantes e podem ser coletadas de forma permanente e detalhada somente através de sistemas de pesagem em movimento em alta velocidade (HS-WIM).
- Na engenharia de transporte rodoviário, a necessidade de informações de carga, que só é gerada por sistemas HS-WIM, é especialmente relevante para o projeto e para a gerência/avaliação de pavimentos e de pontes. Nos últimos dez anos, o estado da arte nessas duas áreas, no que diz respeito à utilização de conceitos de mineração de dados para extração de conhecimentos de bases de dados HS-WIM, evoluiu em direção ao desenvolvimento de modelos que permitem estimar as cargas de tráfego em locais onde não há monitoramento e também para cenários futuros.
- A revisão sistemática realizada indica que as áreas de estudo envolvendo pontes e pavimentos são predominantes na pesquisa que envolve a aplicação de mineração de dados para extração de conhecimentos de bases HS-WIM. A mesma tendência foi observada na análise bibliométrica com todos os principais trabalhos que envolvem a pesagem em movimento (como um todo), uma vez que os agrupamentos com maior incidência de trabalhos envolviam exatamente essas duas áreas.
- As aplicações que visam o controle do excesso de peso de veículos são relevantes pois visam garantir a proteção da infraestrutura existente, a segurança viária, além da fluidez e da competitividade na operação do sistema de transportes. No entanto, a utilização de modelos de mineração de dados para esse fim, baseados na extração de conhecimentos de bases de dados HS-WIM, ainda é incipiente e pouco documentada na literatura.

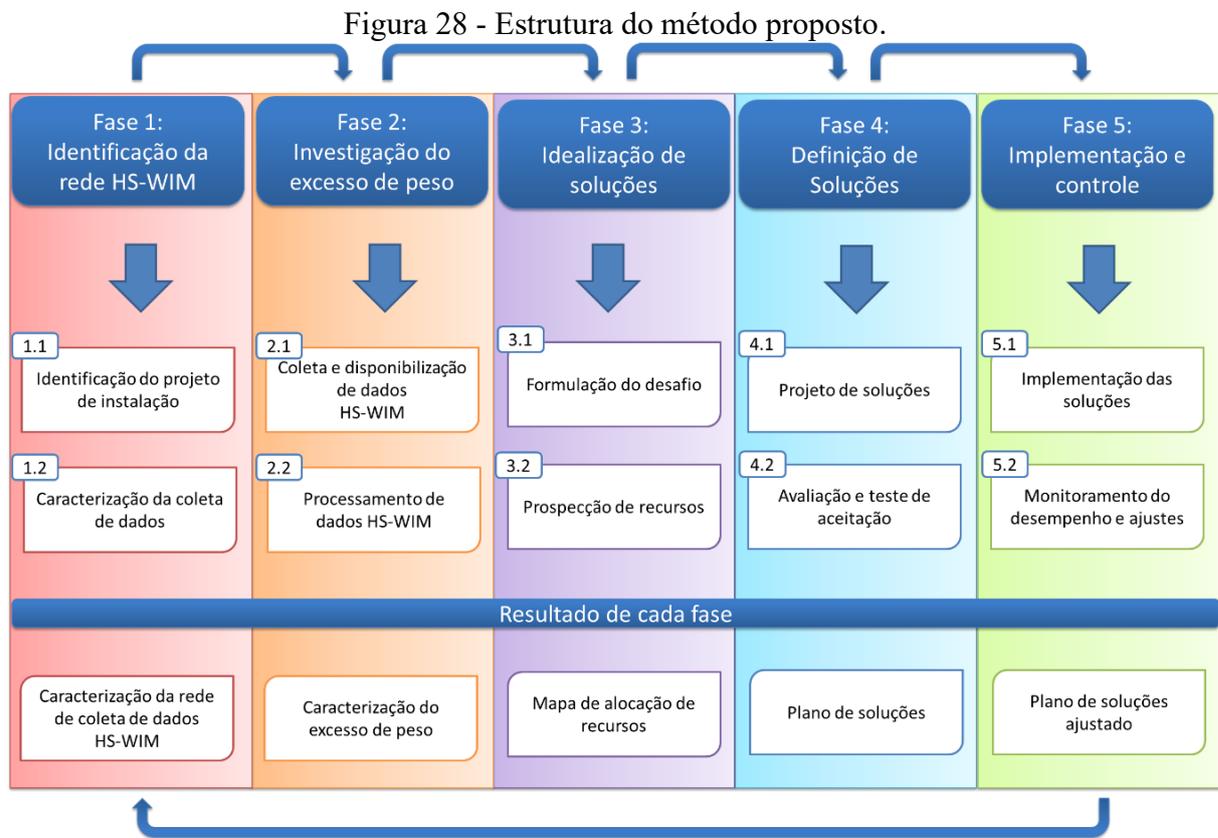
- A revisão realizada indica que, mesmo com uma maior disseminação e utilização de tecnologias HS-WIM, é comum que não haja dados com qualidade e especificidade suficientes para todos os locais onde há demanda por informações de carga do tráfego de veículos. Nesse contexto, diferentes técnicas relacionadas ao conceito de Mineração de Dados têm sido aplicadas sobre dados HS-WIM com o intuito de tornar essas bases de dados transferíveis em termos espaciais e temporais. Em outras palavras, as técnicas de mineração de dados têm sido utilizadas para tornar o conhecimento extraído de bases de dados HS-WIM transferíveis para diferentes locais e intervalos de tempo, principalmente por meio de técnicas de *Clustering*, que permite que padrões de tráfego sejam associados entre si, através de correlações multidimensionais.
- Os trabalhos analisados apontam que a distribuição das classes de veículos pesados, as distribuições temporais e as frequências de carga são atributos relevantes para caracterizar o tráfego de um local. Assim, é possível inferir esses atributos também são relevantes para a caracterização do tráfego de veículos com excesso de peso.
- A classificação veicular é frequentemente apontada como um fator determinante para a caracterização do tráfego viário. Nesse contexto, os trabalhos analisados trazem ideias sobre diferentes formas de segmentar ou de agrupar as classes de veículos para a realização de estudos de tráfego e sobre como os atributos para segmentação podem se tornar mais detalhados ou simplificados por meio da utilização de outros dados fornecidos pelo sistema HS-WIM.
- O estudo das cargas de veículos pesados visando à otimização da fabricação de pneus, como apresentado por Schmidt et al. (2016), abre caminho para outros tipos de investigações sobre o carregamento de veículos pesados, pois utiliza meios inovadores de se analisar dados de carga de veículos, em função do centro de gravidade das cargas úteis.
- O conhecimento sobre a independência ou interdependência da distribuição dos diferentes tipos de veículo pesados entre as diferentes épocas do ano, como abordado no trabalho de Roh et al. (2018), pode promover a efetividade dos controles de tráfego e apoiar a obtenção de parâmetros confiáveis, que caracterizam o tráfego pesado de uma rodovia ou de um sistema viário. Nesse sentido, é possível afirmar que o mesmo se aplica para aplicações cujo objetivo é o controle do excesso.
- Dentre todos os trabalhos analisados, aquele que proveu mais embasamento e *insight* para o desenvolvimento do presente método foi elaborado por Bosso et al. (2019), que

utilizou árvores de regressão como meio de caracterizar o excesso de peso de veículos a partir de dados históricos de pesagem em movimento.

- As árvores de classificação atraíram especial atenção, pois apresentam uma forma resumida, visual e intuitiva de compreender grandes quantidades de dados HS-WIM, em função de múltiplos atributos. Nesse sentido, verificou-se que, uma única árvore de classificação pode efetivamente sintetizar e caracterizar os resultados de meses de coleta de dados HS-WIM. Sua estrutura gráfica hierárquica facilita a interpretação dos dados e permite uma imediata associação das informações extraídas com o conhecimento prévio do usuário.

4 DESCRIÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO

O método de apoio à definição de soluções para controle do excesso de peso em veículos, proposto no presente trabalho, baseia-se na coleta e no processamento de dados de sistemas de pesagem em movimento em alta velocidade (HS-WIM). Esse método será desempenhado em processos cíclicos, através dos quais dez etapas serão executadas, de forma sequencial, divididas em cinco fases, conforme mostra o infográfico abaixo:



Fonte: Autor (2021)

A estrutura do método proposto é composta por cinco fases e um total de dez processos. A seqüência das fases e processos é inspirada no modelo *Creative Problem Solving* (CPS), fornecido por (PUCCIO et al., 2006). No modelo CPS, diferentes etapas do processo de resolução de problemas se iniciam com uma fase divergente, através da qual realiza-se a busca por muitas, novas e diversas alternativas. A fase divergente, muitas vezes referida como fase de “pensamento divergente” é seguida por uma fase convergente, na qual realiza-se o afinamento, identificação e ou desenvolvimento das soluções mais promissoras para resolução do problema em questão. Esse equilíbrio e alternância entre pensamento divergente e convergente é a marca do processo de CPS.

A primeira fase do método proposto consiste na identificação da rede de sistemas HS-WIM, que pode ser composta por um ou por múltiplos sistemas HS-WIM instalados em determinada rede viária. Portanto, nessa fase, realiza-se a identificação do projeto de instalação e a caracterização da coleta de dados realizada pelos sistemas HS-WIM a serem considerados para apoio à definição de soluções para controle do excesso de peso de veículos, resultando na descrição da rede de coleta de dados HS-WIM no escopo da aplicação do método.

Na segunda fase, investigação do excesso de peso, ocorre a coleta e o processamento de dados de sistemas HS-WIM para geração de informações e caracterização da prática do sobrepeso no local onde os dados foram coletados. Nessa fase, realiza-se uma análise detalhada sobre o problema a ser abordado com vistas a caracterizar o excesso de peso e auxiliar a posterior identificação do objetivo, do desejo ou do desafio a ser proposto. A base da fase de investigação é a coleta de dados, através da qual é possível descrever ou gerar informações que viabilizem um entendimento claro do problema.

A terceira fase do método consiste na idealização de soluções para controle do excesso de peso. Para isso, deve-se formular o desafio, ou seja, tornar mais preciso o entendimento sobre o problema que se deseja endereçar, e criar perguntas que convidam à elaboração de soluções para o mesmo. Nesse sentido, a partir de um entendimento claro sobre o excesso de peso que seja controlar, busca-se a geração de soluções com o potencial de atender ao desafio delimitado. O resultado da fase de idealização de soluções é a associação dos recursos disponíveis para controle do excesso de peso com características específicas do sobrepeso que se deseja controlar.

A quarta fase do método tem como objetivo a definição de ações para o controle do excesso de peso embasadas pelas análises realizadas nas fases anteriores do método. Nesse sentido, com base no entendimento sobre as características do excesso de peso praticado na rodovia e sobre os recursos disponíveis para o controle desse sobrepeso, define-se um plano de soluções para controle do excesso de peso de veículos a ser implementado e monitorado na fase seguinte do método.

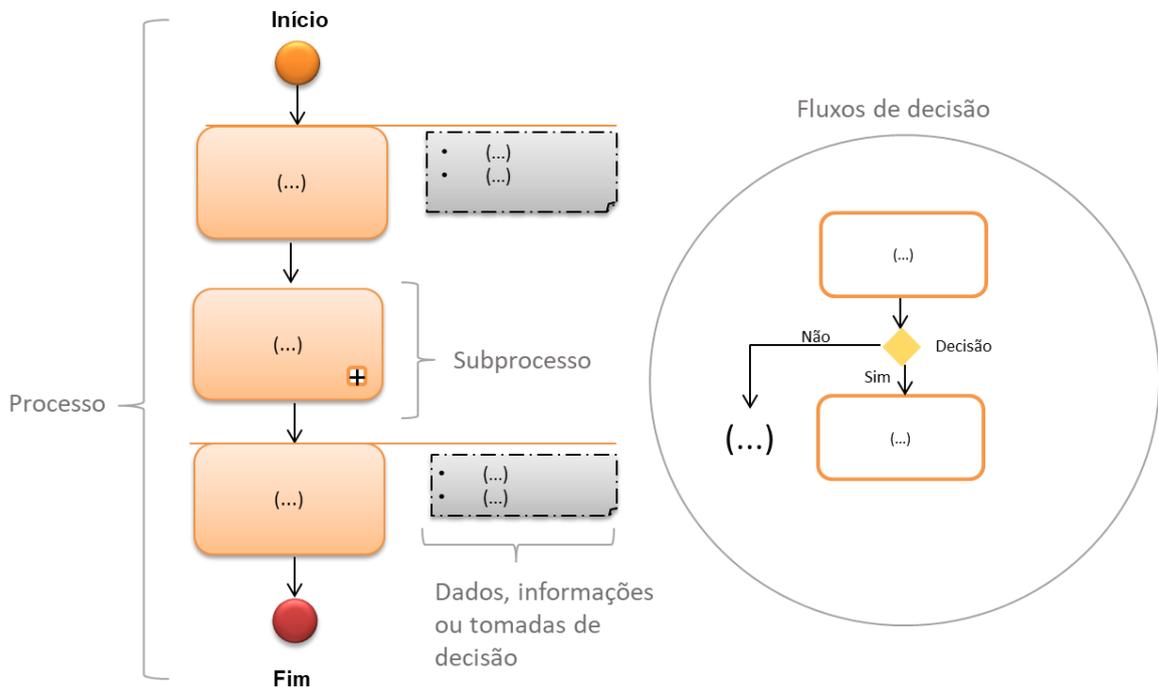
Por fim, a quinta fase do método visa à implementação e o controle da efetividade das soluções para controle dos índices de excesso de peso registrados. Neste contexto, realiza-se a documentação da implementação das soluções propostas, além do monitoramento do desempenho e ajustes do plano de implementação formulado com apoio do método. Como resultado, essa fase culmina na documentação do plano de soluções para controle do excesso de peso ajustado conforme necessidades observadas nos processos de implementação e de

monitoramento do desempenho. Assim, o plano de soluções ajustado deve ser utilizado como base para um novo ciclo de aplicação do método, constituindo um procedimento de melhoria contínua das soluções para controle do excesso de peso.

O trabalho traz consigo a concepção de um método sistêmico, composto por diferentes fases e processos, através dos quais diferentes técnicas interagem entre si para a resolução de um problema comum. As atividades que compõem o método podem ser realizadas em diferentes ambientes e níveis de automatização, a depender do contexto sobre as quais serão aplicadas.

Nas seções a seguir, com objetivo de tornar didática a explicação do método, a descrição de cada um dos seus dez processos é realizada através de representações gráficas inspiradas da técnica BPMN, do inglês *Business Process Model and Notation* (VON ROSING et al., 2014). Nas representações elaboradas, os processos são descritos de forma individual, com a exposição das atividades sequenciais e o detalhamento de eventuais subprocessos, conforme explicado na Figura 29.

Figura 29 - Estrutura das representações gráficas dos processos do método.



Fonte: Autor (2021)

Conforme mostra a Figura 29, os elementos coloridos ilustram o fluxo de ações e subprocessos que compõem o processo em questão. Já os retângulos de cor cinza representam,

de forma sintetizada, os dados, informações geradas ou as tomadas de decisão decorrentes de cada etapa do processo.

4.1 DESCRIÇÃO DA FASE 1 – IDENTIFICAÇÃO DA REDE HS-WIM

A fase de identificação da rede de sistemas HS-WIM tem como objetivo a obtenção de informações sobre as principais características dos sistemas HS-WIM que serão utilizados para aplicação do método, que pode abranger uma ou mais instalações. Neste contexto, a primeira fase do método é composta por dois processos:

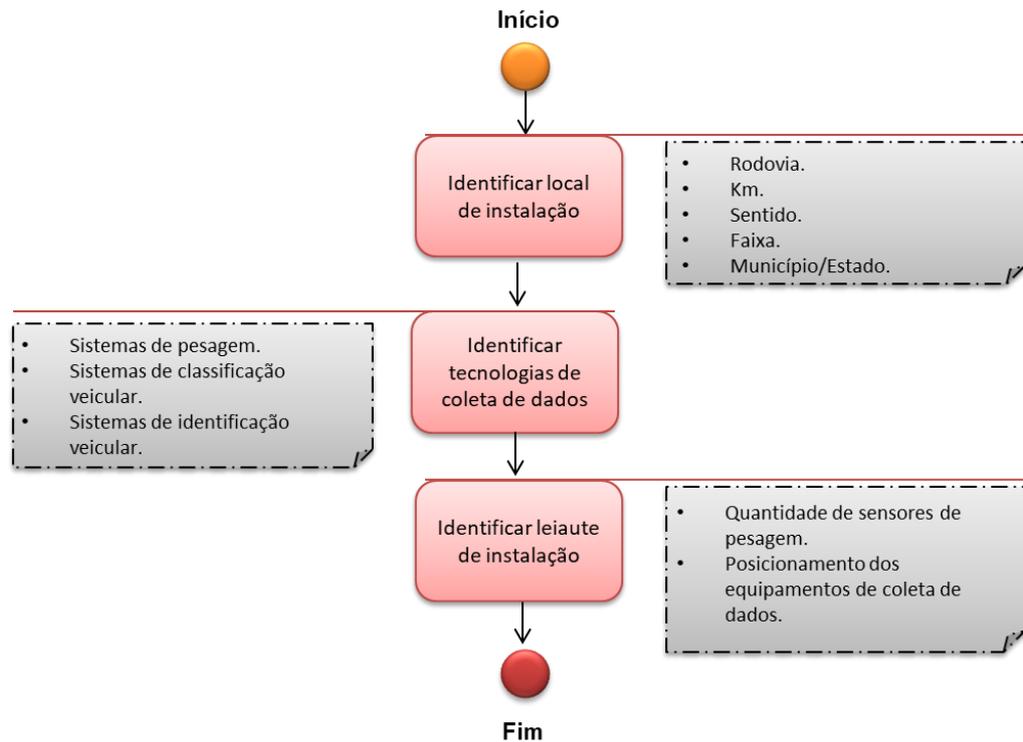
- Identificação dos projetos de instalação dos sistemas HS-WIM.
- Caracterização da coleta de dados realizada pelos sistemas HS-WIM.

A execução sequencial desses processos resulta na caracterização da rede de sistemas HS-WIM em operação, cujos dados serão utilizados para aplicação do método. Os detalhes de cada um desses processos são abordados nas subseções a seguir.

4.1.1 Processo 1.1 - Identificação dos projetos de instalação HS-WIM

A identificação dos projetos de instalação dos sistemas HS-WIM utilizados para aplicação do método é realizada com o objetivo de obter e registrar informações relevantes a respeito do local de instalação e das tecnologias utilizadas para composição desses sistemas. Neste contexto, a Figura 30 apresenta o detalhamento desse processo.

Figura 30 - Processo de identificação dos projetos de instalação HS-WIM.



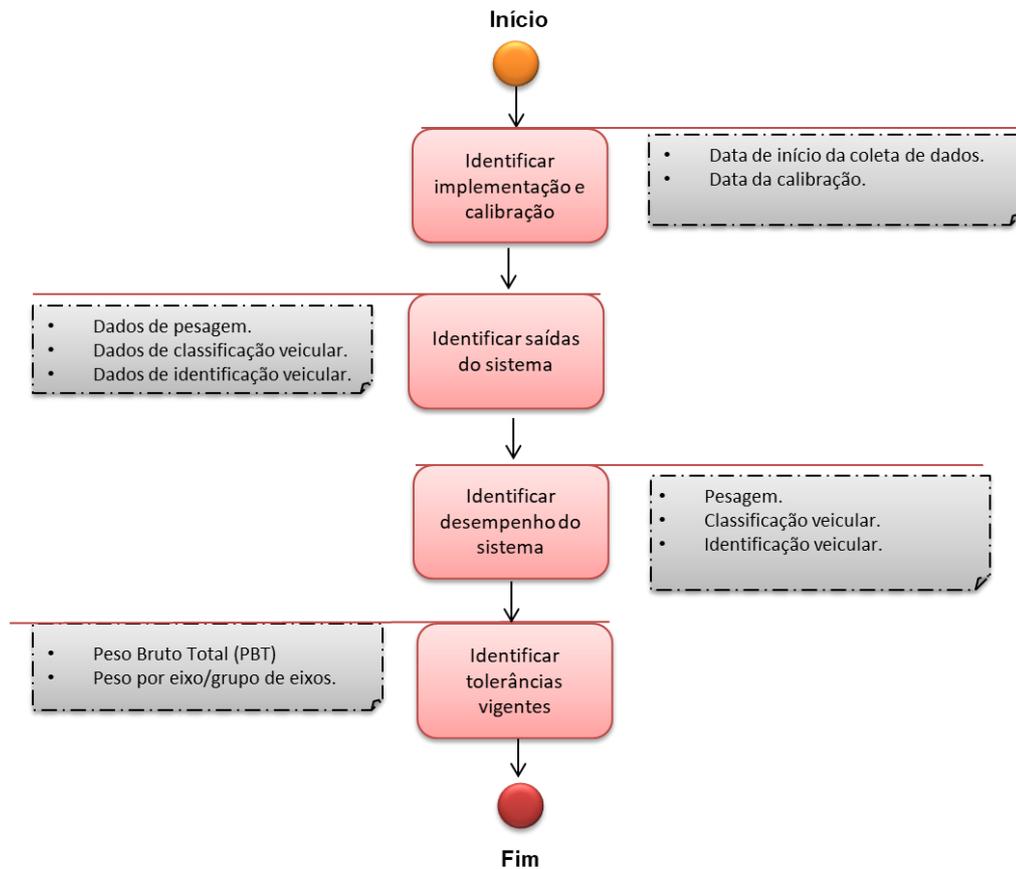
Fonte: Autor (2021)

Como resultado do processo de identificação da rede de sistemas HS-WIM, torna-se possível a obtenção de uma visão geral sobre a quantidade, a localização e as características funcionais dos sistemas que serão utilizados para aplicação do método para que, na sequência, se realize a caracterização da coleta de dados desses equipamentos, já considerando a sua situação pós-implementação.

4.1.2 Processo 1.2 - Caracterização da coleta de dados HS-WIM

O segundo processo da fase de identificação da rede HS-WIM consiste na caracterização da coleta de dados realizada pelos sistemas HS-WIM que compõem essa rede. Nesse sentido, realiza-se a identificação de informações com relevância sobre o escopo e sobre a qualidade dos dados de saída dos equipamentos HS-WIM e de outros dispositivos de ITS a eles integrados. A Figura 31 detalha o processo de caracterização da coleta de dados HS-WIM.

Figura 31 - Processo de caracterização da coleta de dados HS-WIM.



Fonte: Autor (2021)

Como resultado do processo descrito na Figura 31, obtém-se uma relação de informações importantes para o posterior processamento de dados HS-WIM e para o controle do seu desempenho. A partir da obtenção dessas informações, cria-se uma base para o início da coleta e processamento de dados no escopo do método, através da qual será realizado o apoio à tomada de decisão para alocação de recursos voltados ao controle do excesso de peso de veículos.

4.2 DESCRIÇÃO DA FASE 2 - INVESTIGAÇÃO DO EXCESSO DE PESO

A fase de investigação do excesso de peso consiste na aplicação sistemática de uma técnica de processamento de dados HS-WIM para geração de informações relevantes para a gestão viária e para a consequente racionalização dos recursos de fiscalização. Nesse sentido, essa fase é composta por dois processos distintos, sendo esses:

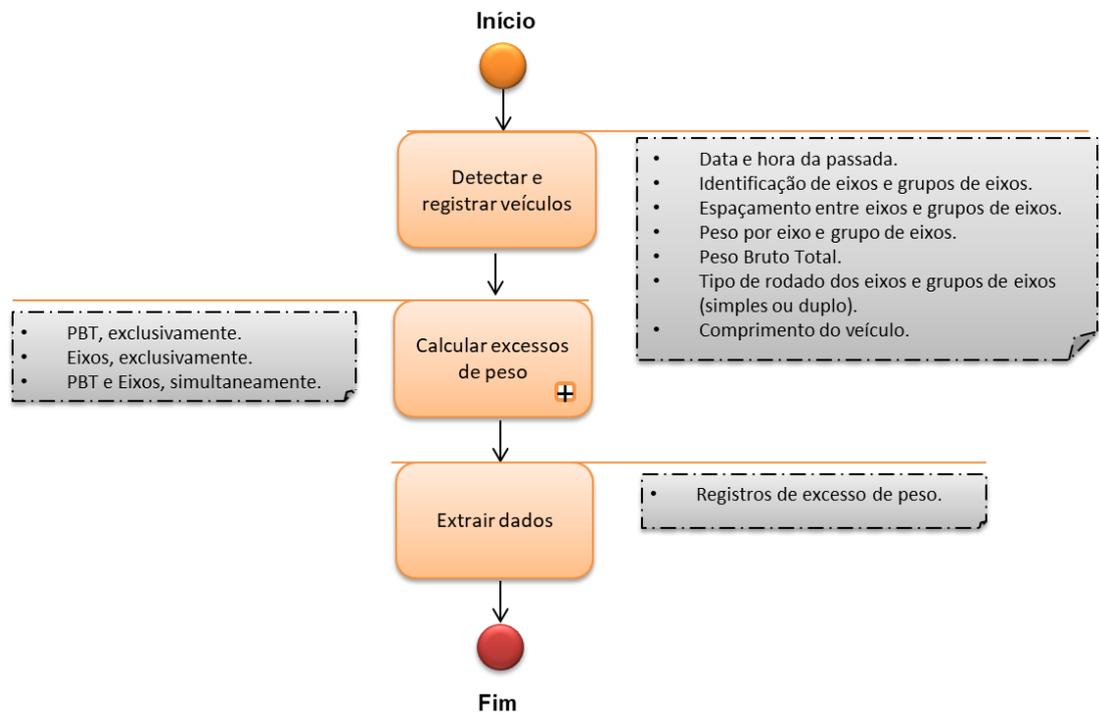
- Coleta e disponibilização de dados HS-WIM.
- Processamento de dados HS-WIM.

Esses processos resultam na caracterização do excesso de peso no local onde os dados HS-WIM foram coletados. Os detalhes de cada um desses processos são abordados nas subseções a seguir.

4.2.1 Processo 2.1 – Coleta e disponibilização de dados HS-WIM

O processo de coleta de dados por meio de sistemas HS-WIM é executado com o objetivo de detectar e registrar, com elevado nível de detalhe, as passagens de veículos com potencial excesso de peso que trafegam sobre o ponto monitorado, em um período de doze meses consecutivos. Esse processo é viabilizado pela operação contínua dos sistemas HS-WIM, cujas saídas permitem verificar quais veículos trafegam por aquele ponto da rodovia com potencial excesso de peso, além das características relevantes sobre esses excessos registrados. Considerando o contexto apresentado, a Figura 32 detalha o processo de coleta de dados, visando à identificação de registros de excesso de peso de veículos em condições brasileiras.

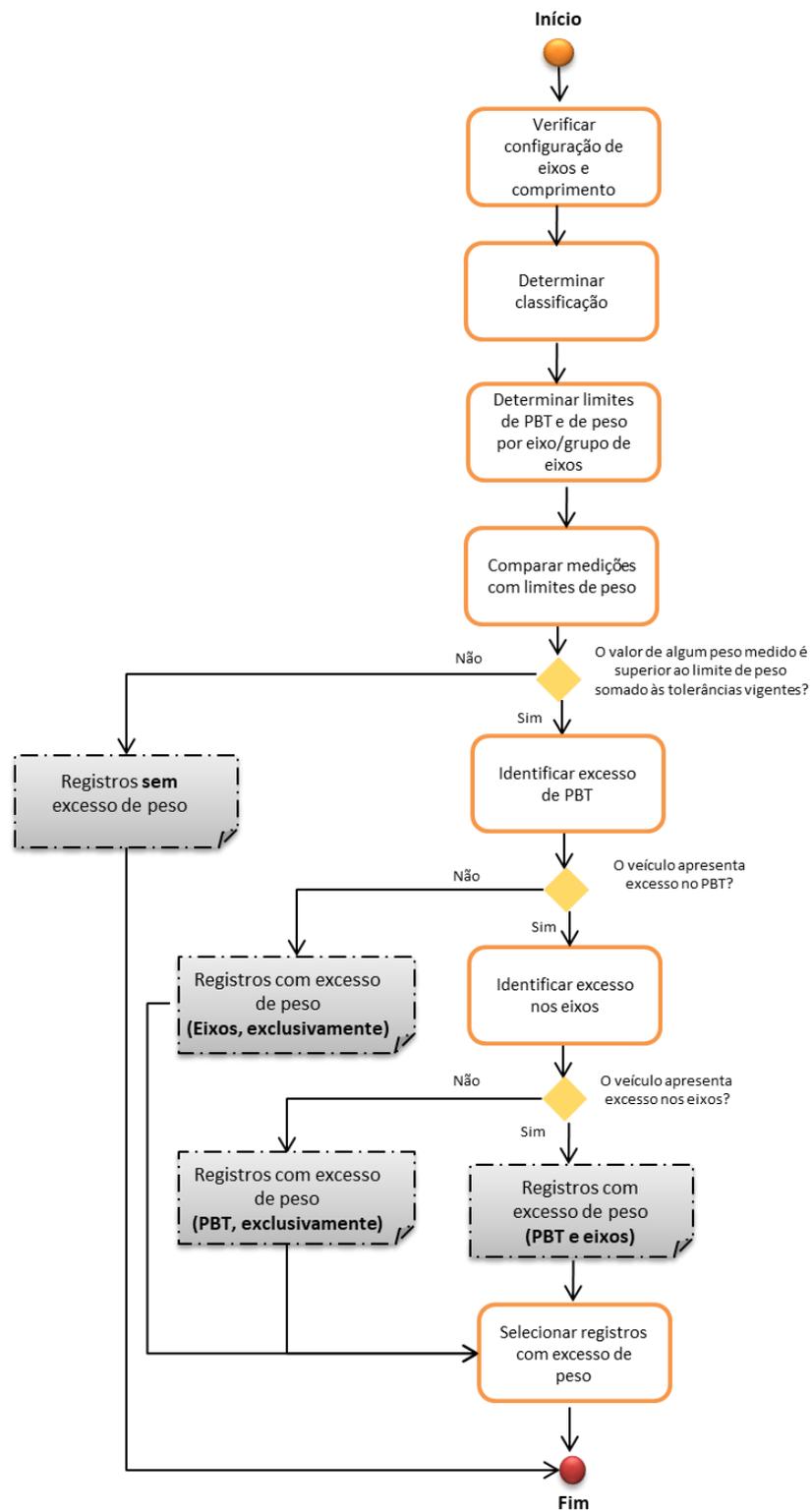
Figura 32 – Processo de coleta e disponibilização de dados HS-WIM.



Fonte: Autor (2021)

A Figura 33 detalha o subprocesso de cálculo do excesso de peso em condições nacionais brasileiras:

Figura 33 – Subprocesso para cálculo dos excessos de peso.



Fonte: Autor (2021)

Como resultado do processo de coleta de dados, obtém-se uma base de registros de excesso de peso, com informações suficientes para a identificação de informações sobre como e em quais circunstâncias essas possíveis irregularidades ocorreram.

No presente método, adotou-se o período de um ano como ciclo de coleta de dados para caracterização do excesso de peso na rodovia, de forma a considerar os possíveis efeitos da sazonalidade nos ciclos de coleta.

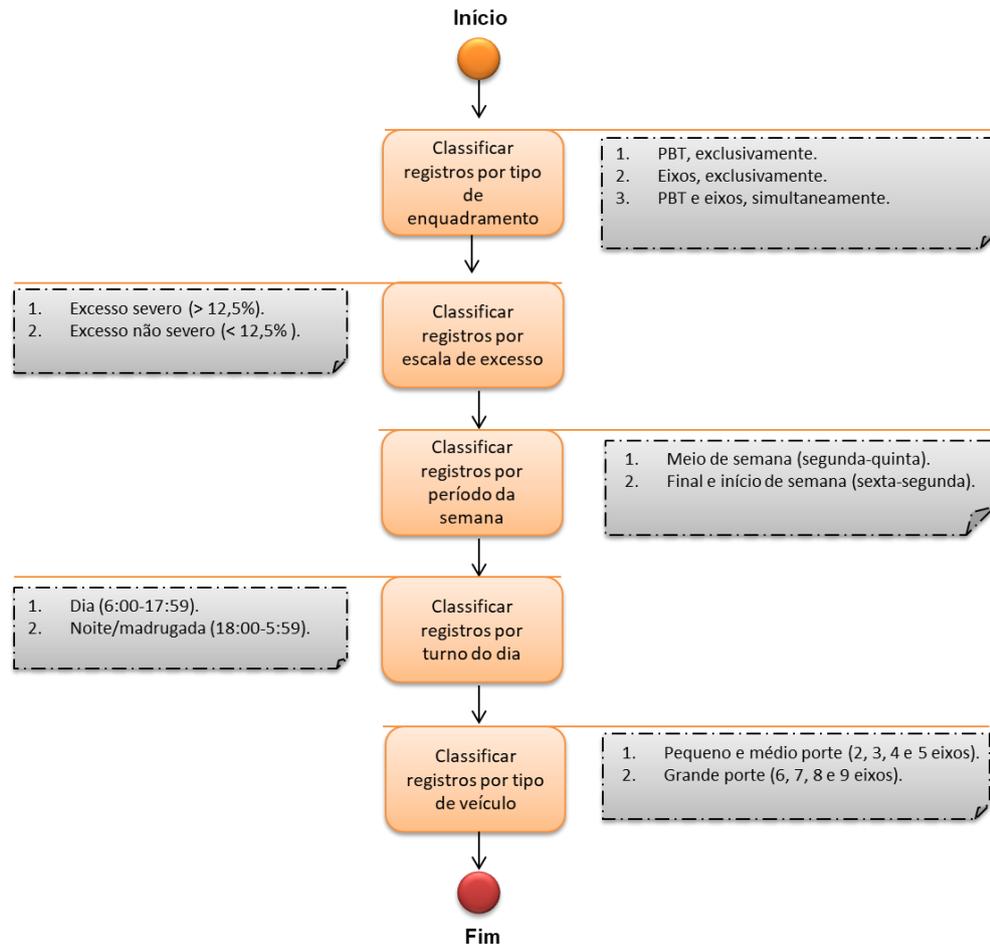
4.2.2 Processo 2.2 - Processamento de dados HS-WIM

A etapa de processamento de dados tem como objetivo viabilizar a execução de consultas sobre a base de registros de excesso de peso previamente coletada, de maneira que esses dados gerem informações relevantes que caracterizam o excesso de peso praticado no local onde o sistema HS-WIM foi implantado. No presente método, o processamento dos dados HS-WIM consiste em processos de análise e de classificação dos registros de veículos com sobrepeso, divididos em função dos três tipos de enquadramento de infrações por excesso e peso, exigentes na legislação de trânsito brasileira. Esses enquadramentos são estabelecidos pela Portaria do DENATRAN nº 03, de 06 de janeiro de 2016, conforme itens que seguem:

- a) 683-1 / 1: Transitar com o veículo com excesso de peso PBT/PBTC (Veículos com sobrepeso no PBT, exclusivamente).
- b) 683-1 / 2: Transitar com o veículo com excesso de peso - por Eixo (Veículos com sobrepeso nos eixos, exclusivamente).
- c) 683-1 / 3: Transitar com o veículo com excesso de peso - PBT/PBTC e por Eixo (Veículos com sobrepeso no PBT e nos eixos, simultaneamente).

Assim, de forma individual para cada tipo de enquadramento descrito, o processamento dos registros de sobrepeso deve ser realizado com o auxílio de ferramentas computacionais, conforme sequência de atividades descrita na Figura 34.

Figura 34 – Classificação dos registros de sobrepeso coletados pelo sistema HS-WIM.



Fonte: Autor (2021)

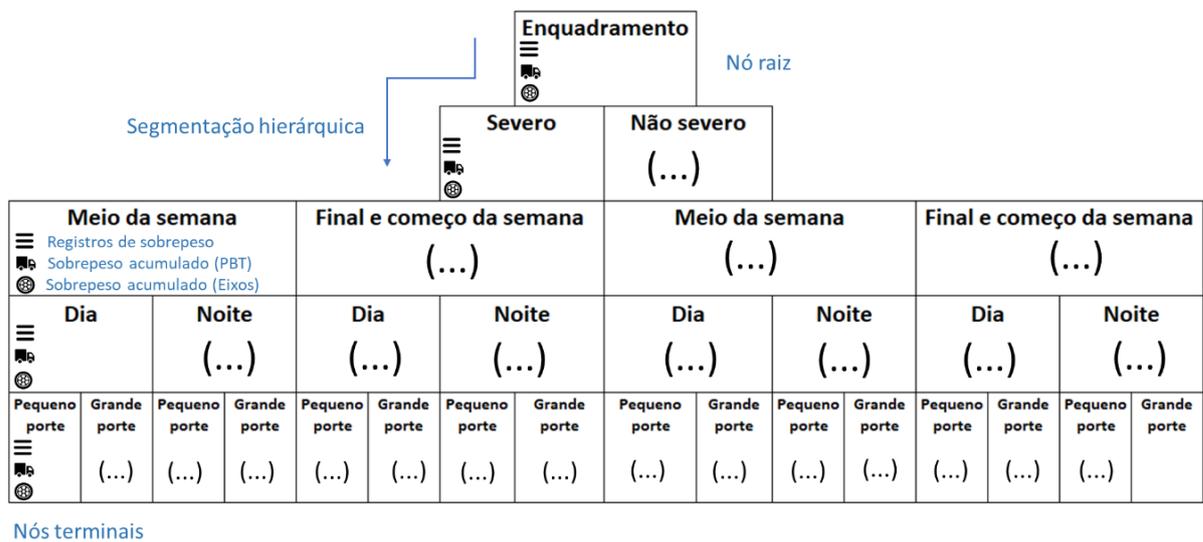
Conforme demonstrado na Figura 34, cada registro de veículo com excesso de peso é classificado de acordo com seguintes critérios:

- **Sobrepeso severo** = Registro de veículo com pelo menos 1 excesso de peso por eixo acima de 12,5% do limite legal, incluindo a tolerância (passível de remanejamento ou transbordo da carga, conforme legislação vigente).
- **Sobrepeso não severo** = Registro de veículo cujo(s) excesso(s) de peso por eixo não excede(m) 12,5% do limite legal (passível de autuação e liberação).
- **Final e início de semana** = sexta, sábado, domingo e segunda (até 12:00).
- **Meio de semana** = segunda (após 12:00), terça, quarta e quinta.
- **Dia** = 6:00h – 17:59h
- **Noite/madrugada** = 18:00h – 5:59h
- **Veículos de pequeno e médio porte** = até 5 eixos (2, 3, 4 e 5 eixos).
- **Veículos de grande porte** = 6 ou mais eixos (6, 7, 8 e 9 eixos).

Para promover a simplicidade da representação gráfica dessas árvores e facilitar a sua interpretação, optou-se por uma classificação binária para a maior parte dos atributos, onde cada nó se desdobra entre outros dois nós. No entanto, para que não haja uma super simplificação dos resultados obtidos, os atributos de classificação podem ser analisados, de forma detalhada e complementar, através de histogramas, que constituem o método mais tradicional de se analisar dados HS-WIM observado na literatura.

Após a classificação dos registros de sobrepeso em função dos cinco tipos de atributos descritos, os resultados das análises são estruturados em três árvores de classificação, que se dividem em função do tipo de enquadramento dos registros de sobrepeso. Nesse contexto, a Figura 35 ilustra a estrutura e a lógica estabelecida para montagem dessas árvores de classificação.

Figura 35 – Árvore de classificação de registros de excesso de peso.



Fonte: Autor (2021)

Conforme demonstra a Figura 35, os registros de excesso de peso são estruturados de forma hierárquica e subdivididos em função de suas classificações binárias. O nó raiz se refere ao tipo de enquadramento (ou tipo de excesso de peso), e os nós terminais se referem à uma combinação de atributos, que representa uma parcela desse nó raiz. Entre o nó raiz e os nós terminais, cada registro de excesso de peso é classificado em relação a 5 atributos distintos.

As análises no escopo do presente método são realizadas em função de dois indicadores específicos, sendo esses:

- **Registros de sobrepeso:** quantidade de registros para determinada combinação de atributos.
- **Sobrepeso acumulado:** somatório, em toneladas, da quantidade de excesso de peso registrada, para determinada combinação de atributos.

Para cada nível de atributos na árvore de classificação, são calculados os valores absolutos referentes àquela combinação de atributos.

A definição das classes de atributos foi feita com base em dois critérios. O primeiro critério são as classificações intrínsecas à definição do excesso de peso tais como tipo de excesso e escala do excesso, que influenciam diretamente sobre a forma como a potencial infração é abordada. Pode-se considerar essas classificações como “classificações legais”. Os demais tipos de classificação buscam agrupar os itens de características semelhantes em grupos de tamanho similar, visando uma distribuição razoavelmente equivalente entre esses grupos. Assim, enquadram-se nesse critério as distribuições em função dos intervalos de tempo, tais como dias da semana e hora do dia.

A classificação de dados em árvores de classificação é uma técnica de mineração de dados, cujo objetivo geral é tratar cada atributo de determinado evento como evidência para enquadrá-lo uma categoria ou em outra. Nesse contexto, árvores de classificação são similares a árvores de regressão, mas ao invés de prever um valor com base em atributos, são previstas classes ou categorias. Assim, através da estruturação dos resultados nessas árvores, torna-se possível a visualização, de maneira objetiva e intuitiva, dos atributos ou conjuntos de atributos que mais contribuem para os diferentes tipos e escalas de excesso de peso registrados na rodovia.

A Fase 2 resulta na caracterização do excesso de peso, a partir da qual torna-se possível compreender sobre quais circunstâncias o sobrepeso é praticado de forma mais frequente e severa. Com base nesses resultados, os responsáveis pelo controle do excesso de peso no local podem idealizar os tipos e as escalas de excesso de peso que desejam priorizar, iniciando, assim, uma abordagem de trabalho na qual as tomadas de decisão são baseadas em dados que configuram a realidade do problema do excesso de peso.

No presente método, a investigação do excesso de peso é uma etapa que antecede a inserção de qualquer tipo de entrada referente ao tipo de excesso de peso que se deseja controlar ou priorizar, por seus usuários. Dessa forma, as características mais predominantes do sobrepeso local podem contradizer os objetivos de controle inicialmente traçados em um momento onde não se tinha esse conhecimento. Portanto, a formulação do desafio é realizada

após a caracterização do excesso de peso, na fase de idealização de soluções, quando as principais características do sobrepeso local já são conhecidas.

4.3 DESCRIÇÃO DA FASE 3 - IDEALIZAÇÃO DE SOLUÇÕES

A fase de idealização de soluções para o excesso de peso ocorre após a caracterização do sobrepeso local, em um momento onde os usuários do método já possuem um bom nível de conhecimento sobre as especificidades desse problema no trecho rodoviário em questão. Essa fase é composta por três processos distintos, sendo esses:

- Formulação do desafio.
- Prospecção de recursos.

Esses processos ocorrem em sequência e resultam em um mapa de potenciais soluções para controle do excesso de peso. A descrição desses processos é tratada em detalhe nas subseções a seguir.

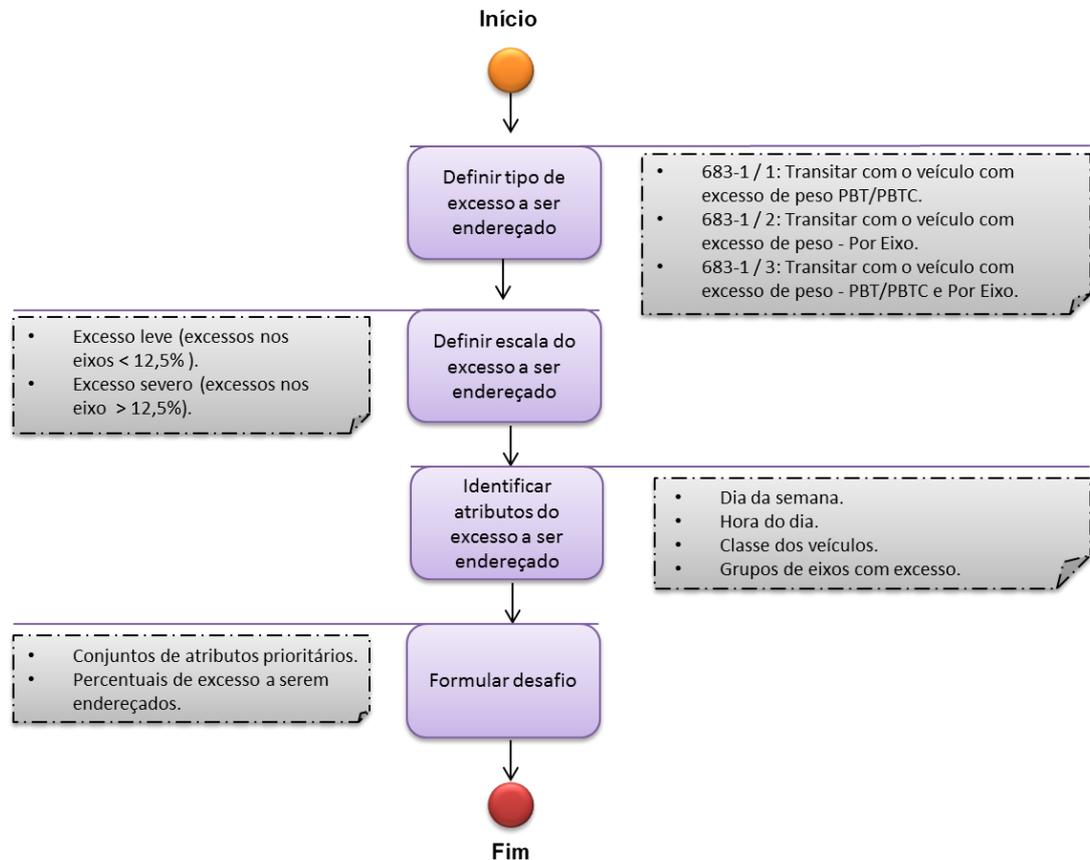
4.3.1 Processo 3.1 – Formulação do desafio

O processo de formulação do desafio é executado com intuito de delimitar o tipo e a escala do excesso de peso que se deseja controlar ou reduzir. Nesse sentido, o processo ocorre através da entrada de duas informações referentes ao objetivo do usuário em relação aos índices de excesso de peso registrados no local onde o sistema HS-WIM realizou a coleta de dados. As referidas entradas são:

- a) Definir tipo de excesso a ser endereçado:
 - Excesso de peso por eixo/grupo de eixos, exclusivamente.
 - Excesso de Peso Bruto Total (PBT), exclusivamente.
 - Excesso de peso por eixo/grupo de eixos e de PBT, simultaneamente.
 - Múltiplas opções.
- b) Definir escala do excesso a ser controlado:
 - Com mais de 12,5% de excesso nos eixos - Excesso severo (passível de retenção, conforme legislação vigente).
 - Com até 12,5% de excesso nos eixos - Excesso não severo (passível de autuação e liberação, conforme legislação vigente).
 - Múltiplas opções.

O fluxograma da Figura 36 tornam explicitas as atividades que compõem o processo de formulação do desafio relacionado ao excesso de peso.

Figura 36 – Processo de formulação do desafio.



Fonte: Autor (2021)

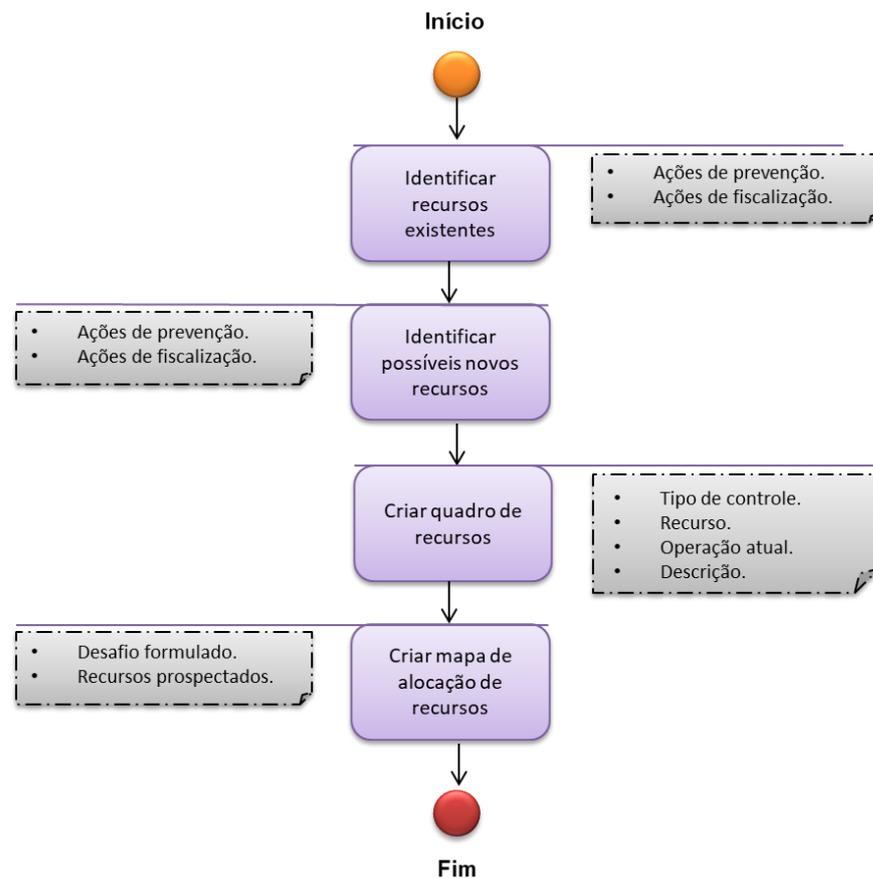
Conforme mostra o fluxograma da Figura 36, o resultado esperado para esse processo é uma definição clara a respeito do tipo e da escala de excesso de peso que se deseja controlar, para que posteriormente seja possível trabalhar na escolha da estratégia mais adequada para os objetivos idealizados.

A formulação do desafio tende a ser influenciada pela etapa de caracterização do excesso de peso, mas isso não é uma obrigatoriedade. Para efeito de exemplo, determinado local pode apresentar uma predominância de excessos de peso por eixo, enquanto os responsáveis pelo controle desses excessos decidem pela priorização do controle dos excessos de Peso Bruto Total (PBT) devido ao risco de colapso de uma ponte na mesma rodovia.

4.3.2 Processo 3.2 – Prospecção de recursos

A identificação dos recursos potenciais e existentes é um processo cuja finalidade é possibilitar que os usuários do método tenham um entendimento claro sobre quais meios e ferramentas poderão ser empenhados em atividades visando à redução ou o controle do excesso de peso no local estudado. Nesse sentido, cabe salientar que diferentes alternativas para controle do excesso de peso podem ser identificadas ou desenvolvidas, a depender do nível de flexibilidade das organizações responsáveis por esse controle. Neste contexto, a Figura 37 demonstra a sequência de ações do processo de prospecção de recursos para controle do excesso de peso caracterizado.

Figura 37 – Processo de prospecção de recursos.



Fonte: Autor (2021)

Conforme mostra a Figura 37, o processo de prospecção de recursos para controle do excesso de peso ocorre de maneira livre, sem julgamento sobre a adequabilidade das soluções idealizadas. Nesse sentido, devem ser considerados todos os meios possíveis com potencial de

reduzir ou controlar os índices de excesso de peso que compõem o desafio formulado. Por fim, cabe ressaltar que a prospecção de novos recursos, ou seja, recursos que até então nunca foram utilizados pela organização em questão, pode trazer soluções inovadoras ou soluções de controle de outras organizações até hoje documentadas.

A Fase 3 deste método resulta na criação de um mapa de alocação de recursos com potencial de controlar ou reduzir os índices de excesso de peso que compõem o desafio formulado. Esse mapa realiza a alocação dos recursos prospectados sobre os nós das árvores de classificação dos registros de sobrepeso correspondentes ao desafio. Assim, nessa atividade, é realizada a associação de recursos com o desafio formulado.

O mapa de alocação dos recursos deve conter uma visão clara dos diferentes segmentos do excesso de peso que se deseja controlar ou reduzir, acompanhada de um quadro de recursos com potencial de controlar ou reduzir esses índices. Este quadro consiste em uma lista de meios e ferramentas com o potencial de controlar ou reduzir os índices de excesso de peso que compõem o desafio formulado para determinado trecho rodoviário.

Os resultados da Fase 3 dependem de cada organização e da sua respectiva estrutura dedicada para o controle do excesso de peso. A proposta do método, no entanto, é que a utilização dos recursos prospectados, independentemente de quais recursos, venha a ser posteriormente realizada de forma mais racional e efetiva para os propósitos idealizados.

4.4 DESCRIÇÃO DA FASE 4 - DEFINIÇÃO DE SOLUÇÕES PARA O EXCESSO DE PESO

A quarta fase do método de apoio à definição de ações de controle do excesso de peso em veículos, baseado no processamento de dados HS-WIM, visa à definição e à implementação de diretrizes para ações com potencial de reduzir ou controlar, pontualmente, os índices de sobrepeso do local analisado. Nessa fase do método, são consideradas as conclusões obtidas na fase de investigação e os potenciais recursos prospectados na fase de idealização, o que permite que sejam projetadas soluções de prevenção e de fiscalização especificamente voltadas às características do sobrepeso local e direcionadas aos atores que praticam o excesso de peso de forma mais significativa, conforme critérios e prioridades da organização responsável pelo controle do excesso de peso. Nesse sentido, essa fase é composta por dois processos distintos, sendo esses:

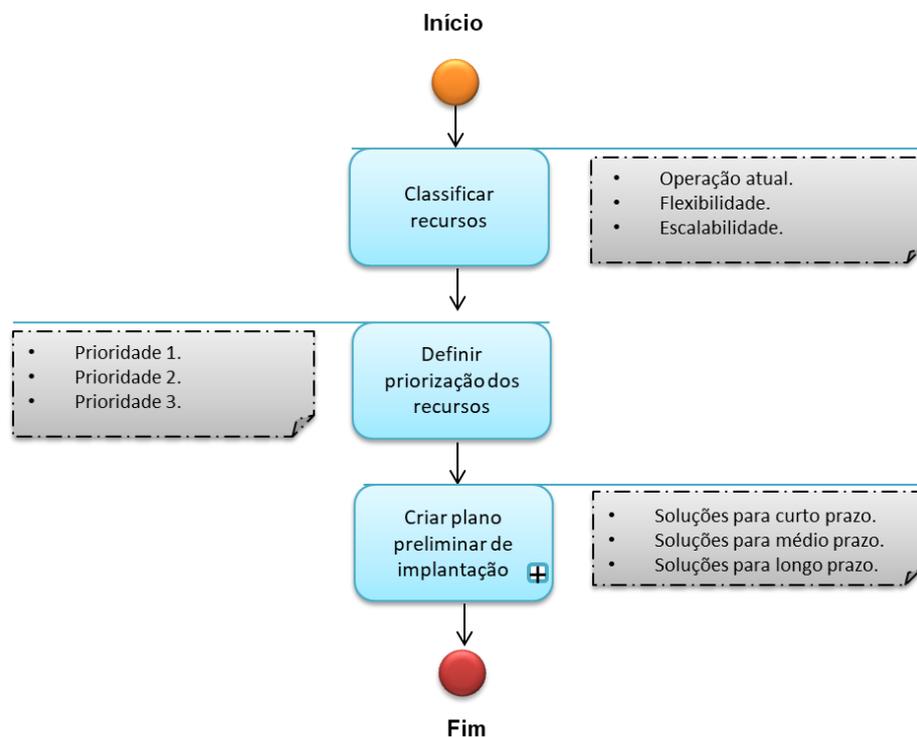
- Projeto de soluções
- Avaliação e teste de aceitação.

Esses processos ocorrem em sequência e resultam em um plano de implantação das soluções para controle do excesso de peso. Nesse sentido, a operação de cada um desses processos é detalhada nos subcapítulos que seguem.

4.4.1 Processo 4.1 – Projeto de soluções

O projeto de soluções consiste em classificar os recursos prospectados, criar níveis de priorização desses recursos em função das suas características no âmbito da organização responsável pelo controle do excesso de peso e, por fim, criar um plano preliminar de implantação desses recursos, direcionando-os especificamente para parcelas de excesso de peso que compõem o desafio formulado. Neste contexto, o fluxograma da Figura 38 descreve o processo para projeto de soluções.

Figura 38 – Processo para projeto de soluções.



Fonte: Autor (2021)

Conforme ilustra a Figura 38, o projeto de soluções para controle do excesso de peso se inicia com a classificação dos recursos prospectados. Nesse sentido, cada potencial recurso é classificado em função da sua operação atual (existência da sua operação na organização), da sua flexibilidade (possibilidade de adaptação ou modificação da operação) e da sua escalabilidade (possibilidade de expansão da sua área de abrangência). Uma demonstração de classificação dos recursos, com base em soluções de controle do excesso de peso documentadas neste trabalho, é mostrada no Quadro 3.

Quadro 3 – Exemplo de classificação dos recursos.

Tipo de controle	Recurso	Operação atual	Flexibilidade	Escalabilidade
Fiscalização	Postos fixos de pesagem	Sim	Não	Não
	Postos fixos com balança móvel	Não	Sim	Não
	Fiscalização móvel	Sim	Sim	Não
Prevenção	Classificação de transportadores	Não	Sim	Sim
	Controle de acesso	Não	Sim	Sim
	Pedágio por peso	Não	Não	Não

Fonte: Autor (2021)

Após a classificação dos recursos, executa-se um subprocesso de definição do nível de priorização de cada solução idealizada para o controle do excesso de peso. Essa priorização é realizada em função da observação da prévia existência da solução na organização responsável pelo controle do excesso de peso, da flexibilidade da solução para mudanças na sua operação e da escalabilidade dessa solução para expansões em sua área de influência. O referido subprocesso ocorre em função de uma matriz de combinações das variáveis supracitadas, conforme mostra o Quadro 4.

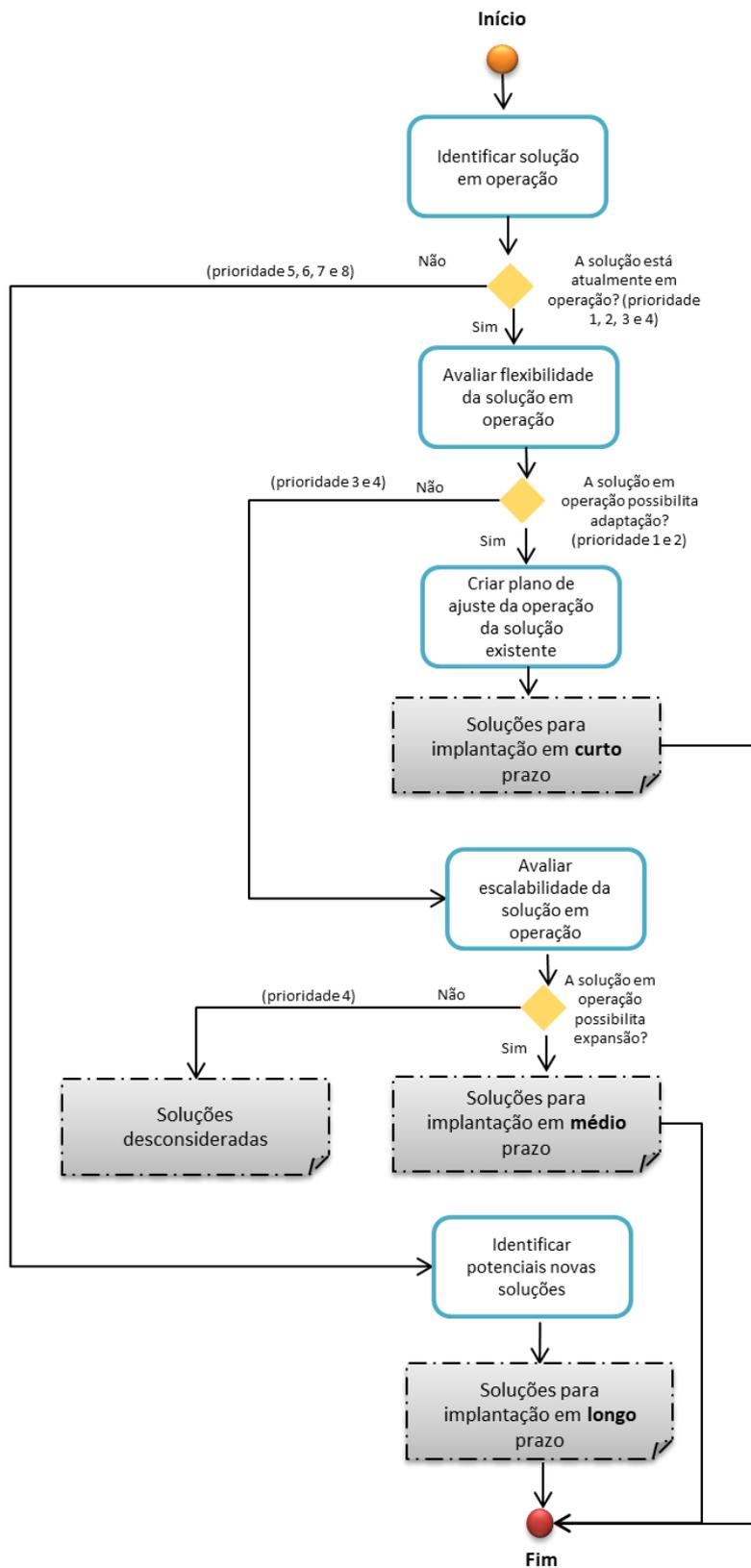
Quadro 4 – Matriz para priorização dos recursos.

Prioridade	Operação atual	Flexibilidade	Escalabilidade	Descrição
1	Sim	Sim	Sim	Solução em operação, com flexibilidade e com escalabilidade
2	Sim	Sim	Não	Solução em operação, com flexibilidade e sem escalabilidade
3	Sim	Não	Sim	Solução em operação, sem flexibilidade e com escalabilidade
4	Sim	Não	Não	Solução em operação, sem flexibilidade e sem escalabilidade
5	Não	Sim	Sim	Nova solução, com flexibilidade e escalabilidade
6	Não	Sim	Não	Nova solução, com flexibilidade e escalabilidade
7	Não	Não	Sim	Nova solução, sem flexibilidade e com escalabilidade
8	Não	Não	Não	Nova solução, sem flexibilidade e sem escalabilidade

Fonte: Autor (2021)

Por fim, o projeto das soluções de controle do excesso de peso passa pelo agrupamento das soluções idealizadas em grupos de implantação de curto, médio e longo prazo, o que culmina em um plano preliminar de implantação. Nesse sentido, esse processo de tomada de decisão ocorre em função dos índices de priorização calculados, em um subprocessos mostrado no fluxograma da Figura 39.

Figura 39 – Subprocesso para criação do plano preliminar de implantação.



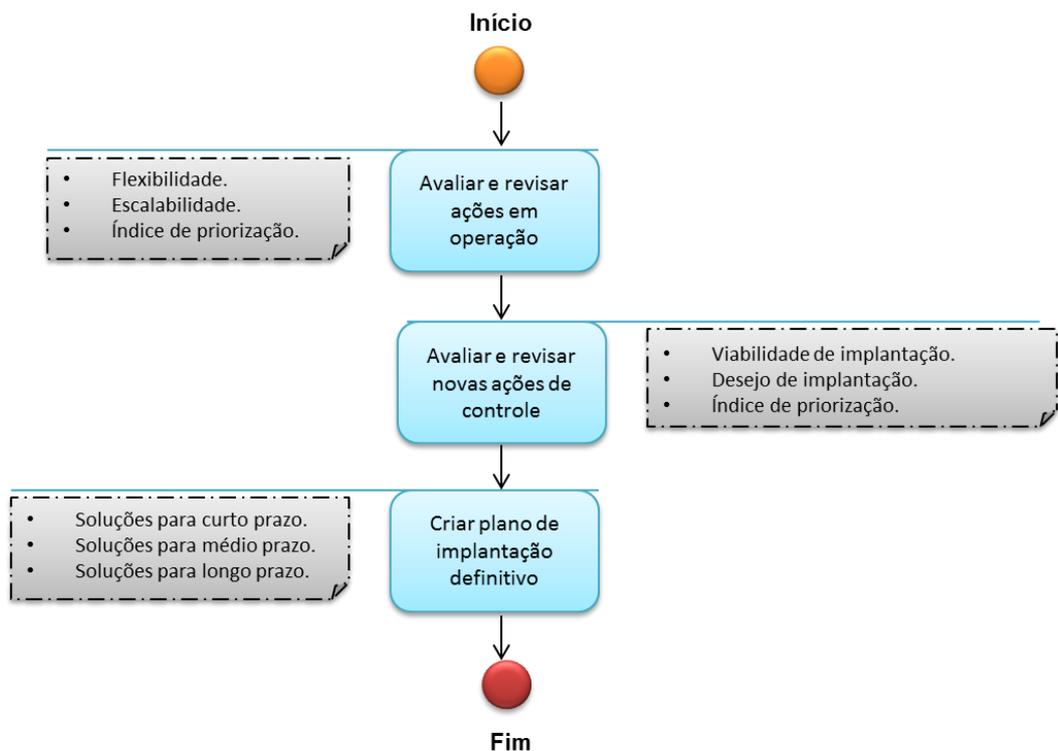
Fonte: Autor (2021)

O resultado esperado para o processo que envolve o projeto de soluções consiste na elaboração de um plano preliminar de potenciais soluções para controle do excesso de peso, agrupadas em função do tempo estimado de implantação de ação e destinadas especificamente para parcelas do excesso de peso que se deseja controlar. Essa análise considera os recursos existentes, a capacidade de flexibilização e/ou expansão desses recursos, o percentual de excesso de peso de se deseja endereçar e o tempo para implementação dessas ações.

4.4.2 Processo 4.2 - Avaliação e teste de aceitação

Este processo consiste em avaliar a aceitação do plano de implantação idealizado, pela organização responsável pelo controle do excesso de peso no local onde o método é aplicado. Neste contexto, o processo tem como objetivo remover ações inviáveis para a organização e fazer ajustes em relação à priorização inicialmente realizada. Assim, a sequência de atividades que viabilizam a execução do processo de avaliação e teste de aceitação é ilustrada no fluxograma da Figura 40.

Figura 40 – Processo de avaliação e teste de aceitação.



Fonte: Autor (2021)

Conforme mostra a Figura 40, no o processo de avaliação e teste de aceitação, as ações idealizadas para o controle do excesso de peso local são divididas entre as ações atualmente em operação e as novas ações idealizadas para a organização. Nesse sentido, enquanto as ações em operação serão avaliadas, junto à organização responsável, em relação a sua flexibilidade e escalabilidade, as novas ações de controle serão avaliadas em relação a sua viabilidade e desejo de implantação pela organização. Ambas avaliações resultam em uma potencial revisão dos índices de priorização previamente estabelecidos.

A Fase 3 se encerra com a criação de um plano de implantação definitivo para as ações de controle do excesso de peso, aprovado pela organização responsável por esse tipo de atividade no local e área de influência sobre a qual o método está sendo aplicado. Esse plano de implementação deve demonstrar de forma clara as informações sobre o tipo, a escala e os atributos do excesso que se deseja controlar; além das ações de curto, médio e longo prazo associadas com cada parcela do excesso de peso considerada. Esta definição servirá para facilitar o processo de implementação das ações e o controle do seu desempenho ao longo do tempo.

4.5 DESCRIÇÃO DA FASE 5 - IMPLANTAÇÃO E CONTROLE DO DESEMPENHO

A última fase para aplicação do presente método consiste na implementação e no acompanhamento do desempenho das ações de controle do excesso de peso idealizadas com auxílio do método. Em termos objetivos, essa fase tem como propósito colocar em prática o plano de controle do excesso de peso desenvolvido e verificar o seu desempenho ao longo do período de 12 meses.

A Fase 5 é composta por dois processos distintos, sendo esses:

- Implantação das soluções.
- Controle do desempenho e ajustes.

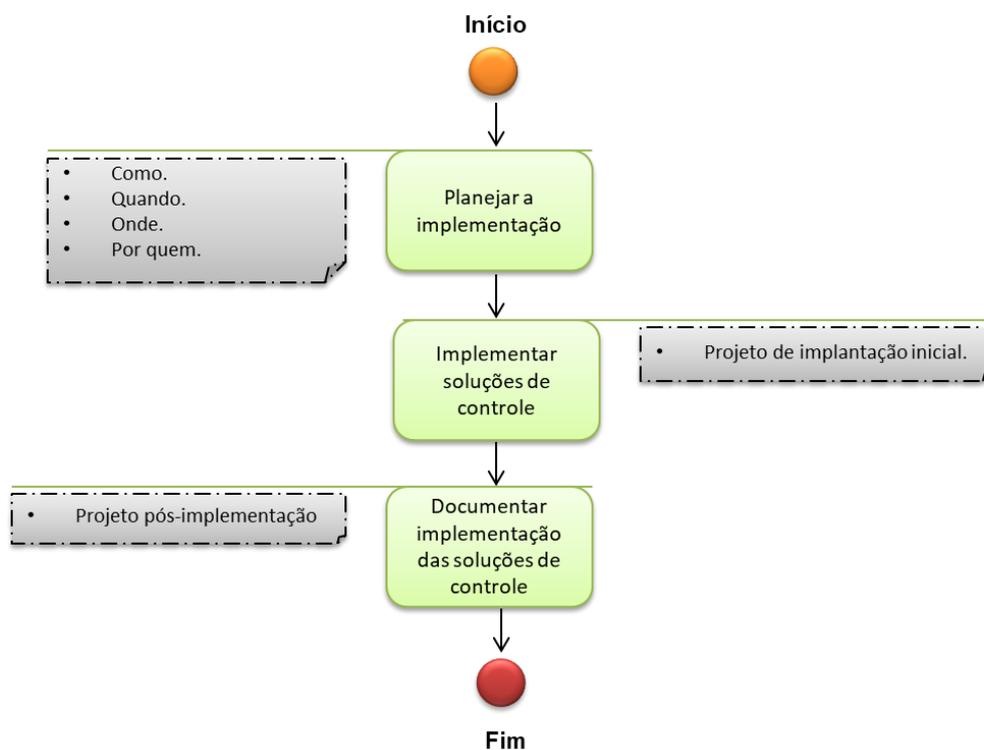
A execução dos processos supracitados culmina na elaboração de um plano de implantação ajustado das soluções para controle do excesso de peso, resultado da documentação das adequações consideradas necessárias após os processos de implantação e operação das referidas soluções.

A operação dos dois processos que compõem a Fase 5 do método é detalhada nos subcapítulos que seguem.

4.5.1 Processo 5.1 - Implementação das soluções

O processo de implementação das soluções tem como objetivo central operacionalizar o plano de controle do excesso de peso desenvolvido e documentar a situação final desse plano de ação após os ajustes realizados no período de implementação. O fluxograma da Figura 41 exibe a sequência de ações e os elementos mais determinantes que caracterizam os resultados específicos que compõem esse processo.

Figura 41 – Processo de implementação das soluções.



Fonte: Autor (2021)

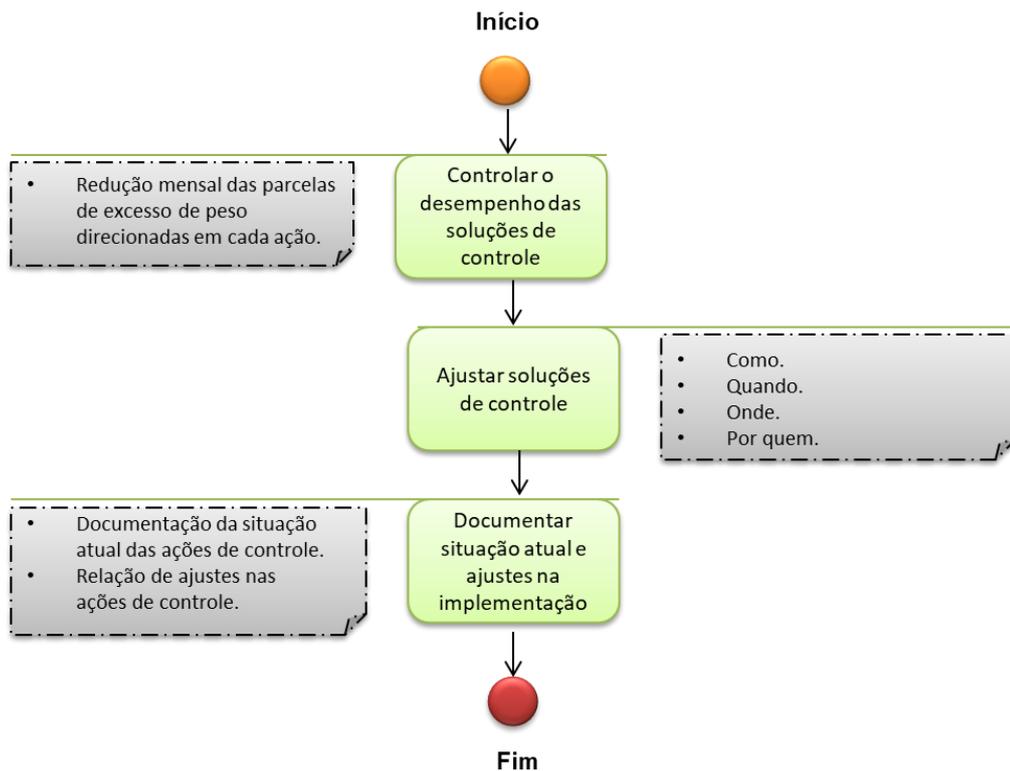
Assim como ocorre em diferentes tipos de projeto, a implementação de uma solução para controle do excesso de peso pode passar por desafios que não são antecipados no momento em que esta solução é projetada ou quando teve a sua implementação planejada. Portanto, o presente método visa acomodar este tipo de situação, resultando na documentação da situação pós-implementação do projeto, considerando que possam haver diferenças em relação ao plano inicialmente traçado.

4.5.2 Processo 5.2 - Monitoramento do desempenho e ajustes

O último processo que compõe o presente método consiste em verificar o desempenho das soluções para controle do excesso de peso ao longo do período de doze meses, documentando os ajustes e a situação final do projeto após as adequações realizadas pós-implantação. Neste contexto, monitora-se mensalmente os índices de redução de cada parcela de excesso de peso para as quais ações de controle foram direcionadas, e realizam-se os ajustes necessários para melhoria contínua do controle do excesso de peso.

Considerando o contexto apresentado, o fluxograma da Figura 42 exibe a sequência de ações que compõem o presente processo.

Figura 42 – Processo de monitoramento do desempenho e ajustes.

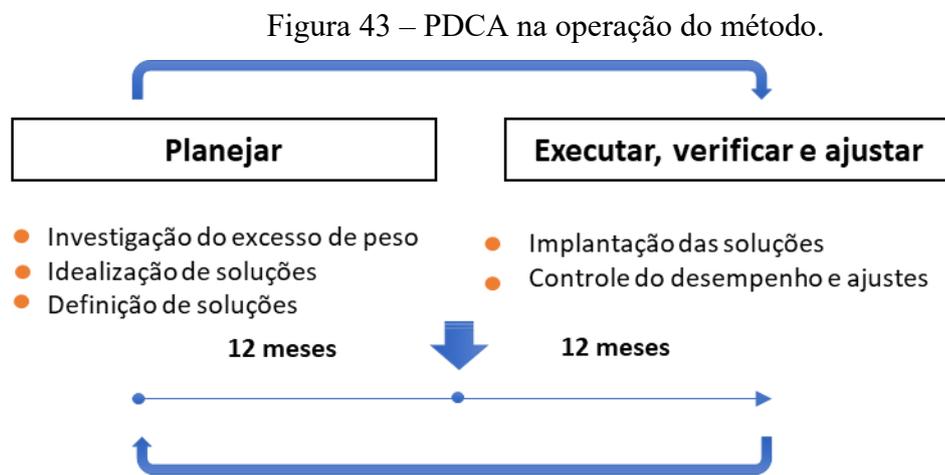


Fonte: Autor (2021)

O processo de controle do desempenho se inicia a partir da implantação definitiva de determinada solução para controle do excesso de peso. Por fim, o resultado esperado para esse processo consiste na documentação da situação atual do projeto após o período monitoramento

e ajustes, além de uma relação objetiva de todos os ajustes e atualizações realizados nas soluções inicialmente projetadas.

A execução contínua de um processo de controle do desempenho e ajustes torna o método cíclico e semelhante à técnica de controle e melhoria de qualidade conhecido como PDCA, do inglês *Plan-Do-Control-Act*. O ciclo PDCA foi introduzido na década de 1950 por Willian Edwards Deming e hoje é utilizado amplamente na indústria e na ciência para o desenvolvimento de ciclos de produção com melhoria contínua. A relação entre os ciclos de execução do presente método e a técnica PDCA é demonstrada na Figura 43.



Fonte: Autor (2021)

A aplicação dos processos que compõem o presente método ocorre em um período total de 24 meses, sendo 12 meses de coleta de dados ininterrupta para investigação do excesso de peso, idealização e definição de soluções; e outros 12 meses para implantação, controle e ajustes das soluções desenvolvidas. Todos os ajustes realizados sobre o projeto de implantação inicial, incluindo as necessidades de mudanças observadas no processo de implementação das soluções e as alterações operacionais realizadas a partir do controle do desempenho, devem ser documentadas para embasar os novos ciclos de desenvolvimento de ações de controle do excesso de peso.

5 DEMONSTRAÇÃO DA APLICABILIDADE DO MÉTODO PROPOSTO

A demonstração da aplicabilidade do método proposto foi realizada com base no processamento de doze meses de coleta de dados em um sistema de pesagem em movimento em alta velocidade, do inglês *High-Speed Weigh-in-Motion* (HS-WIM), instalado no Km 416 da rodovia BR-101 Sul, no município de Araranguá/SC. Os dados foram cedidos pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), que desenvolve estudos e pesquisas no campo da pesagem em movimento no Brasil desde 2007.

No local onde foi realizada a coleta de dados utilizada no presente estudo, foram registrados 848.299 veículos pesados entre os meses de junho de 2016 e junho de 2017 (12 meses). Por se tratar de uma aplicação experimental, a fase de implementação não foi considerada para demonstração. Assim, a demonstração da aplicação do método proposto foi executada através das quatro fases iniciais previstas no método, sendo elas:

- Identificação da rede de sistemas HS-WIM.
- Investigação do excesso de peso.
- Idealização de soluções para o excesso de peso.
- Definição de soluções para o excesso de peso.

O detalhamento do processo de aplicação de dados reais para demonstração do método proposto é tratado em maior nível de detalhe nas subseções que seguem.

5.1 DEMONSTRAÇÃO DA FASE 1 – IDENTIFICAÇÃO DA REDE HS-WIM

A primeira fase do método proposto consiste na identificação e caracterização da rede de sistemas HS-WIM considerada para aplicação do método. Essa rede pode ser composta por múltiplos sistemas HS-WIM ou também por um único sistema. Neste contexto, a presente fase tem como resultado a caracterização da rede de coleta de dados HS-WIM no escopo da aplicação do método.

Primeiramente, a fase se inicia com a identificação do(s) projeto(s) de instalação dos sistemas HS-WIM utilizados na aplicação do método. Neste contexto, verificam-se as informações a respeito do local de instalação, das tecnologias utilizadas e do leiaute de instalação de cada sistema. Assim, o resultado desse processo nesta demonstração é exibido no Quadro 5.

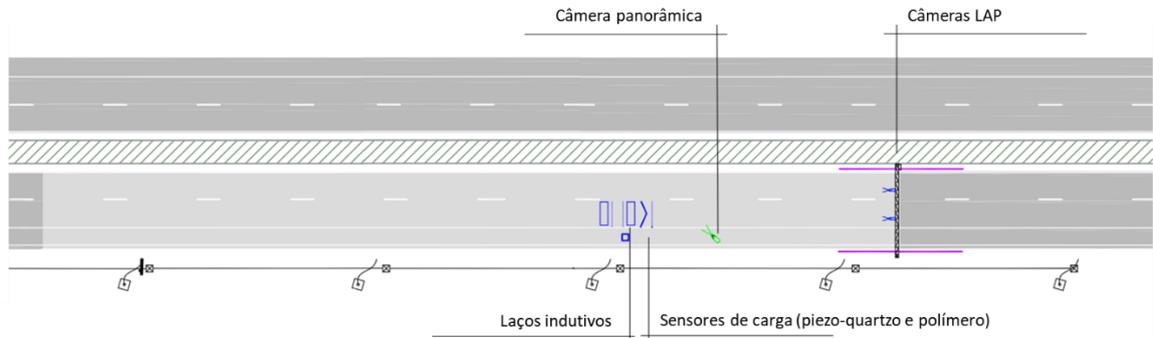
Quadro 5 – Identificação dos projetos de instalação HS-WIM.

Local de instalação	Tecnologias	Leiaute
<ul style="list-style-type: none"> • BR-101 Sul. • Km 416. • Faixa 1. • Araranguá/SC. 	Sensores piezo-quartzo	2 linhas de sensores piezo-quartzo (4 sensores).
	Sensores piezo-polímero	2 sensores piezo-polímero diagonais.
	Laços indutivos	2 laços indutivos.
	Câmeras LAP	2 câmeras LAP, cobrindo as duas faixas de rolamento.
	Câmera panorâmica	1 câmera panorâmica, cobrindo toda a seção da via.

Fonte: Autor (2021)

Conforme detalha o Quadro 5, na presente aplicação do método, será utilizado um único sistema HS-WIM, instalado no Km 416 da rodovia BR-101 Sul, no município de Araranguá/SC. Esse sistema é composto por dois tipos de sensores de carga, laços indutivos câmeras LAP e uma câmera panorâmica. O leiaute do sistema pode ser melhor visualizado na Figura 44.

Figura 44 – Leiaute do sistema HS-WIM.



Fonte: Autor (2021)

Os sensores de carga atuam na pesagem e na classificação veicular, a partir do contato com os eixos dos veículos. Os sensores diagonais, especificamente, permitem a detecção da posição lateral do veículo do momento da pesagem e a detecção de eixos com rodado duplo. Por sua vez, os laços indutivos atuam na ativação das soluções e na medição do comprimento veicular. Por fim, os dispositivos de câmeras atuam na identificação veicular, através da Leitura Automática de Placas (LAP) e registro de imagens panorâmicas que permitem a visualização da configuração de eixos de cada veículo que passa sobre o sistema.

O conhecimento sobre o local de instalação do HS-WIM considerado para esta demonstração do método permite que se obtenha um panorama geral sobre a área de influência do excesso de peso registrado pelo sistema. No mesmo sentido, a identificação do leiaute de instalação e das tecnologias de pesagem, de classificação veicular, de identificação automática de veículos (IAV), possibilitam a prospecção das funcionalidades e do nível de desempenho esperado para os sistemas.

Após a identificação do projeto de instalação, realiza-se a caracterização da coleta de dados, cujos resultados são demonstrados no Quadro 6.

Quadro 6 – Caracterização da coleta de dados HS-WIM

Data da implementação	Data da calibração	Saídas do pré-processamento	Desempenho esperado do sistema	Tolerâncias vigentes
23/11/2014	17/05/2016	<ul style="list-style-type: none"> ● Data/Hora. ● Placa. ● Classificação. ● Limites Peso. ● PBT. ● Peso por eixo. ● Peso por grupo de eixos. 	<ul style="list-style-type: none"> ● <u>Pesagem:</u> Erro máx. $\pm 10\%$ PBT; $\pm 15\%$ eixos. (nível de confiança 95%). ● <u>Classificação:</u> Erro máx. 5%. ● <u>LAP:</u> Erro máx. 10% detecção; 5% leitura. 	<ul style="list-style-type: none"> ● 5% PBT. ● 10% Eixos.

Fonte: Autor (2021)

As informações a respeito da implementação e da calibração dos equipamentos são relevantes uma vez que os sistemas HS-WIM necessitam manutenção periódica e tendem a perder desempenho ao longo do tempo. Por sua vez, a identificação dos dados de saída desses sistemas é necessária para que seja estruturado o ambiente de processamento dos dados HS-WIM.

Mais importante que a tecnologia utilizada, o desempenho testado para determinada instalação de sistema HS-WIM indica o nível de confiabilidade das suas medições e dos seus registros de excesso de peso. Por fim, as tolerâncias vigentes incidem diretamente sobre o cálculo dos excessos de peso por eixo/grupo de eixos e Peso Bruto Total (PBT), uma vez que o registro de sobrepeso só será considerado quando os valores das medições excederem o limite e as tolerâncias.

5.2 DEMONSTRAÇÃO DA FASE 2 - INVESTIGAÇÃO DO EXCESSO DE PESO

A fase de investigação do excesso de peso tem como finalidade a caracterização da prática do excesso de peso em um trecho ou em uma rede viária, com base na coleta e no processamento de dados de sistemas HS-WIM. Nesse sentido, essa fase do método resulta na classificação e interpretação dos registros de excesso de peso coletados pelos sistemas HS-WIM, de forma que possibilite a compreensão da prática do sobrepeso sobre a ótica de seis atributos que caracterizam cada registro de veículo com excesso.

A primeira etapa da fase de investigação do excesso de peso consiste na coleta de dados HS-WIM. Para fins de ilustração, a Figura 45, que demonstra um recorte com a tabulação dos registros de excesso de peso obtidos, onde cada linha representa um registro de veículo.

Figura 45 – Coleta de Dados HS-WIM em Araranguá/SC

Data e hora	Classe	Velocidade (Km/h)	PBT (kg)	Comprimento (cm)	Peso Eixo 1 (kg)
2016-06-01T00:10:01.030-03:00	2I3	68.0	22139	1578	5544
2016-06-01T00:40:11.100-03:00	2I2	67.1	35989	1474	5794
2016-06-01T02:05:38.770-03:00	2I3	70.1	40499	1767	6486
2016-06-01T04:02:22.880-03:00	2I2	76.2	36314	1359	6035
2016-06-01T04:08:25.040-03:00	2I2	81.1	24445	1794	4830
2016-06-01T04:11:04.700-03:00	2DL	79.8	22532	1853	5034
2016-06-01T04:19:39.350-03:00	2I3	81.0	40169	1805	6128
2016-06-01T04:23:37.950-03:00	2DL	75.9	21963	1734	5110
2016-06-01T04:56:46.260-03:00	2DL	73.2	20643	1826	4873
2016-06-01T05:18:11.730-03:00	2I2	78.9	22732	1757	4780
2016-06-01T05:32:10.940-03:00	2D4	79.8	62733	3028	6117
2016-06-01T06:03:31.990-03:00	2DL	60.4	20237	1733	4362
2016-06-01T06:34:09.590-03:00	2I2	88.8	31203	1747	5666
2016-06-01T07:05:26.310-03:00	2I3	72.5	42410	1805	6136
2016-06-01T07:14:57.670-03:00	2I3	72.6	28637	1714	5780
2016-06-01T07:18:42.050-03:00	2I2	77.4	21664	1812	5016
2016-06-01T07:24:33.960-03:00	2DL	75.1	20515	1807	4598
2016-06-01T07:30:41.090-03:00	2DL	74.9	21314	1752	4453
2016-06-01T07:30:48.290-03:00	2DL	53.6	18574	1946	4751
2016-06-01T07:43:22.640-03:00	2I3	66.2	40938	1725	6012
2016-06-01T08:06:30.400-03:00	2I3	80.6	47620	1819	6366
2016-06-01T08:11:58.970-03:00	2N3	77.9	39427	3000	6027
2016-06-01T08:21:17.270-03:00	2I2	76.1	19978	1434	4734
2016-06-01T09:05:21.180-03:00	2I1	71.8	28828	1704	5279
2016-06-01T09:16:02.050-03:00	2I2	78.5	27519	1722	6084

Fonte: Autor (2021)

A coleta de dados utilizada neste estudo totalizou um ano, ininterrupto, de monitoramento do tráfego pesado em um ponto da rodovia BR-101 Sul, nas proximidades de Araranguá/SC. Assim, durante esse período, foram coletados 848.299 registros de veículos

pesados, que trafegaram pela faixa da direita do trecho rodoviário em que o sistema HS-WIM foi instalado. O referido sistema HS-WIM foi calibrado entre os dias 17 e 20 de maio, 2016 e o período de coleta considerado para análise inclui todas as passagens de veículos pesados que ocorreram entre as 00:00:00h de 01 de junho de 2016, até 23:59:59h de 31 de maio de 2017.

Dos 848.299 registros de veículos pesados coletados, 33851 (3,99%) foram descartados, resultando em 814.448 registros válidos. Os registros descartados apresentaram potenciais inconsistências na classificação veicular e, conseqüentemente, na determinação dos limites de peso dos veículos. Essas inconsistências na coleta podem ocorrer por conta de eixos mecanicamente suspensos, composições veiculares não homologadas, manobras na passagem pelo sensor ou por erro na medição. Assim, cabe ressaltar que rodovias são ambientes pouco controlados e, portanto, a coleta de dados de tráfego de alta precisão exige uma atenção especial sobre a qualidade do processo de coleta e sobre os dados obtidos.

O processamento de dados HS-WIM coletados resultou em 131.299 registros de veículos pesados com excesso de peso. Ou seja, dentre todos os registros válidos, coletados ininterruptamente ao longo de 12 meses, 16,12% apresentarem algum tipo de excesso de peso veicular. Os tipos de excesso de peso podem ser associados a três enquadramentos distintos, conforme prevê a Portaria nº 03 do DENATRAN, de 06 de janeiro de 2016. Esses três enquadramentos são:

- Transitar com excesso no PBT, exclusivamente (código 683-1/1).
- Transitar com excesso de peso por eixo, exclusivamente (código 683-1/2).
- Transitar com excesso no PBT e nos eixos, simultaneamente (código 683-1/3).

Os referidos enquadramentos refletem as diferentes formas de se praticar e de se registrar uma infração de sobrepeso veicular do Brasil, com exceção das infrações por excesso de peso em relação à Capacidade Máxima de Tração (CMT).

Considerando-se o contexto apresentado, o Quadro 7 apresenta um resumo do resultado do processamento de dados HS-WIM, com os totais dos registros de excesso de peso detectados no sistema HS-WIM de Araranguá, divididos entre os três possíveis enquadramentos descritos.

Quadro 7 – Distribuição dos registros de sobrepeso por tipo de enquadramento

Tipo de excesso (enquadramento)	Registros de sobrepeso válidos	Percentual
PBT exclusivamente	30.549	23,27%
Eixos exclusivamente	54.361	41,40%
PBT e Eixos simultaneamente	46.389	35,33%
Total	131.299	100,00%

Fonte: Autor (2021)

Neste estudo, considera-se um “registro de sobrepeso”, ou um “registro de excesso de peso”, cada passagem de veículo com excesso de peso sobre o sistema HS-WIM, independentemente da natureza desse sobrepeso. Assim, conforme mostra o Quadro 6, dentre os três enquadramentos existentes, foi predominante a ocorrência de infrações por excesso de peso nos eixos, exclusivamente. Em termos de frequência do excesso de peso, esse tipo de infração representa 41,40% dos registros de excesso de peso coletados. Esse tipo de excesso está, frequentemente, associado a uma arrumação inadequada dos carregamentos, podendo ser solucionada através do remanejamento da carga ao longo do veículo.

O Quadro 8 apresenta uma outra forma de sintetizar os mesmos resultados, mas considerando as quantidades de excesso de peso, em toneladas (t), registradas ao longo do período de coleta de dados.

Quadro 8 – Distribuição dos registros de sobrepeso por tipo de enquadramento

Tipo de excesso (enquadramento)	Excesso de peso acumulado (t)	
	PBT	Eixos
PBT exclusivamente	57.106,85	-
Eixos exclusivamente	-	31.712,03
PBT e Eixos simultaneamente	126.072,40	80.457,45
Total	183.179,25	112.169,48

Fonte: Autor (2021)

Para fins de conceituação, cabe ressaltar que o presente estudo utiliza o termo “excesso de peso acumulado” para se referir aos somatórios das parcelas de excesso de peso praticadas em determinado grupo de registros de sobrepeso. Nesse sentido, de acordo com os resultados demonstrados no Quadro 7, verifica-se que, por mais que haja mais infrações de excesso de peso por eixo, a quantidade de excesso de peso no PBT é superior. Esse fenômeno pode ser explicado pela interpretação da legislação brasileira, que é mais branda para o sobrepeso por eixo. Primeiramente, a tolerância para os excessos de peso é de 10%, enquanto para PBT esse percentual é de 5%. Segundo, há determinadas classes de veículos que possuem o limite de PBT inferior à soma dos limites por eixo, em decorrência do seu comprimento.

Para exemplificar esses dois casos, pode-se utilizar o veículo 3S3, muito comum no local onde a presente coleta de dados foi realizada. De acordo com a legislação de trânsito brasileira, quando o comprimento desse veículo for inferior a 16 m, seu limite de PBT será de 45 t, enquanto a soma dos seus limites por eixo será de 48,5 t. Essa discrepância entre os limites de peso se torna ainda maior quando acrescidas as tolerâncias, em que o limites vigentes se tornam 47,25 t para o PBT e 53,35 t para a soma dos eixos e grupos de eixos.

O resultado da fase de investigação do excesso de peso é demonstrado em maior nível de detalhe nas subseções que seguem, a partir de uma análise detalhada dos índices de cada uma das três possíveis infrações (enquadramentos) por excesso de peso, de acordo com a legislação brasileira.

5.2.1 Análise preliminar dos índices de excesso de peso registrados

Com o objetivo de contribuir com a interpretação dos resultados e com a extração de conhecimentos da base de dados HS-WIM coletados em Araranguá/SC, os registros de sobrepeso registrados durante os doze meses de coleta foram analisados, de forma preliminar, através de histogramas, que constituem o método mais tradicional de se analisar dados HS-WIM observado na literatura.

As Figuras 46 a 57, a seguir, apresentam gráficos com a distribuição percentual dos índices de excesso de peso registrados no referido período de coleta de dados, em função de intervalos temporais (meses do ano, dias da semana e horas do dia) e classes de veículos pesados. Os gráficos são gerados individualmente para os três tipos de infração (enquadramentos) de sobrepeso veicular, previstas na legislação de trânsito do Brasil.

Além da separação das análises por tipo de sobrepeso veicular (enquadramento), cabe lembrar que o presente método visa caracterizar o excesso de peso de veículos em função de dois indicadores objetivos:

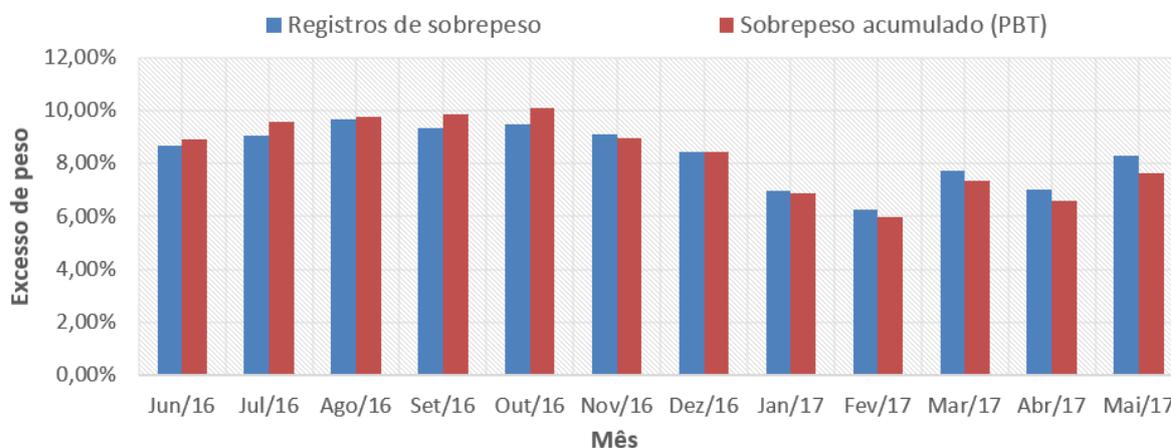
- **Registros de sobrepeso:** quantidade de registros para determinada combinação de atributos.
- **Sobrepeso acumulado:** somatório, em toneladas, da quantidade de excesso de peso registrada, para determinada combinação de atributos.

As subseções a seguir mostram a distribuição percentual desses indicadores em função de intervalos de tempo e da classificação de veículos.

5.2.1.1 Análise do sobrepeso veicular por mês de coleta de dados

A análise dos índices de excesso de peso em função dos diferentes meses de coleta permite observar a evolução da prática do sobrepeso ao longo do tempo, conforme ilustra a Figura 46.

Figura 46 – Registros de infração e sobrepeso acumulado no PBT, por mês de coleta (veículos com excesso no PBT, exclusivamente).

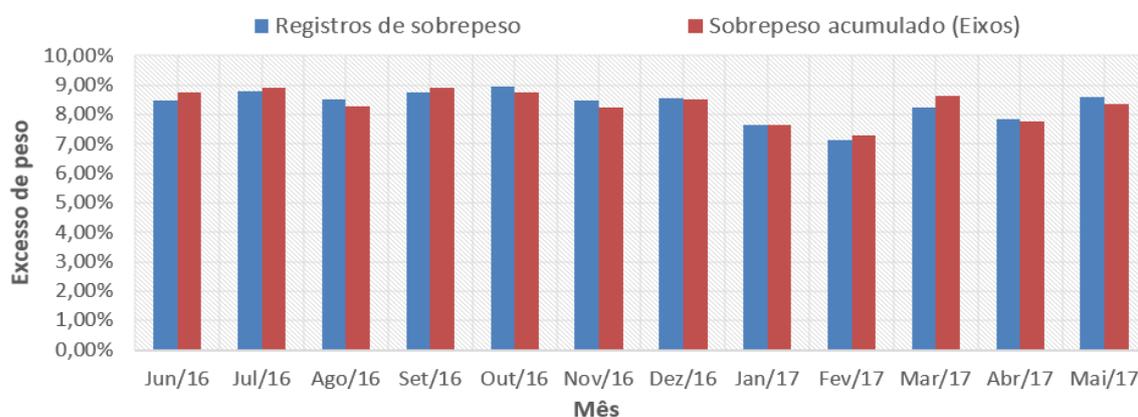


Fonte: Autor (2021)

No que diz respeito aos veículos com excesso no PBT, exclusivamente, o sobrepeso veicular se mostrou mais significativo no segundo semestre de 2016, em relação ao primeiro semestre de 2017. Assim, verifica-se que a sazonalidade pode ser um fator relevante para esse tipo de infração no local.

A Figura 47 ilustra as mesmas distribuições percentuais dos indicadores de sobrepeso, mas considerando os registros de veículos com sobrepeso nos eixos, exclusivamente.

Figura 47 – Registros de infração e sobrepeso acumulado nos eixos, por mês de coleta (veículos com excesso nos eixos, exclusivamente).

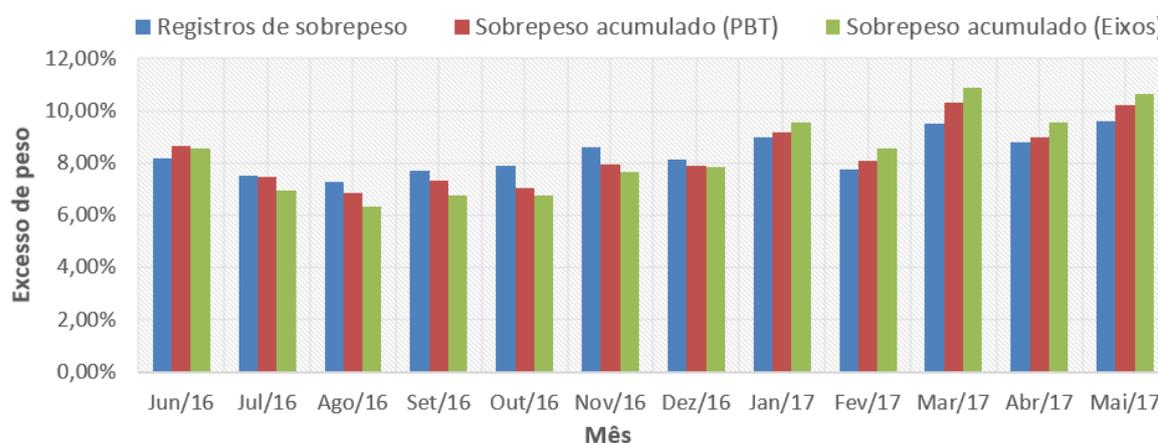


Fonte: Autor (2021)

Nos veículos registrados com sobrepeso nos eixos, sem excesso no PBT, o sobrepeso veicular se mostrou relativamente equilibrado entre os doze meses de coleta, com uma leve queda observada nos meses de janeiro e fevereiro.

A Figura 48 ilustra as distribuições percentuais dos indicadores de sobrepeso, ao longo dos meses de coleta, considerando os registros de veículos com sobrepeso no PBT e nos Eixos, simultaneamente.

Figura 48 – Registros de infração e sobrepeso acumulado no PBT e nos eixos, por mês de coleta (veículos com excesso no PBT e nos eixos, simultaneamente).



Fonte: Autor (2021)

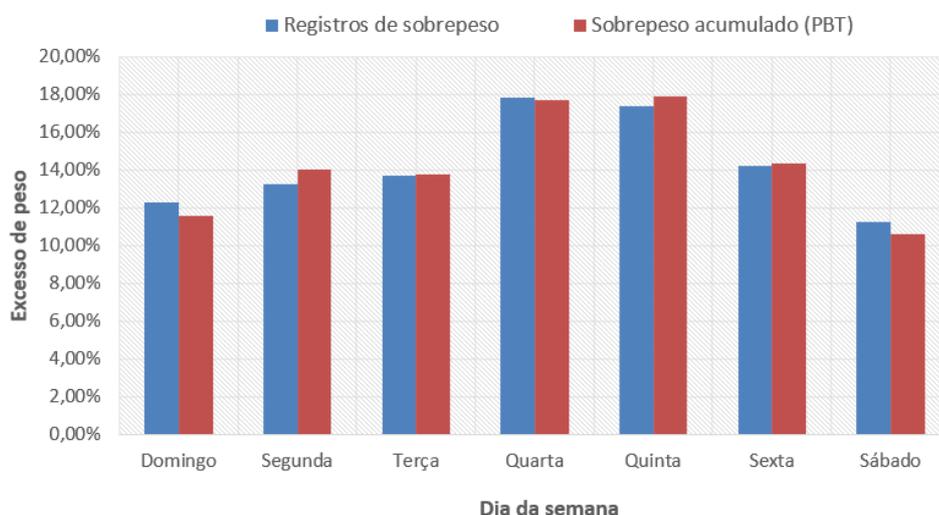
Conforme mostra a Figura 48, a ocorrência e a severidade do sobrepeso de veículos excedendo os limites de PBT e de eixos, simultaneamente, apresentou crescimento com as passar dos meses de coleta, em uma tendência inversamente proporcional à observada na Figura 46.

Como os três gráficos desta seção apresentaram diferenças entre si, verifica-se a sazonalidade influencia, de forma distinta, os três diferentes tipos de infração por excesso de peso de veículos.

5.2.1.2 Análise do sobrepeso veicular por dia da semana

A análise dos índices de excesso de peso em função dos diferentes dias de uma semana possibilita a obtenção de ideias sobre quando o sobrepeso ocorre de forma mais frequente e severa, conforme ilustra a Figura 49.

Figura 49 – Registros de infração e sobrepeso acumulado no PBT, por dia da semana (veículos com excesso no PBT, exclusivamente).

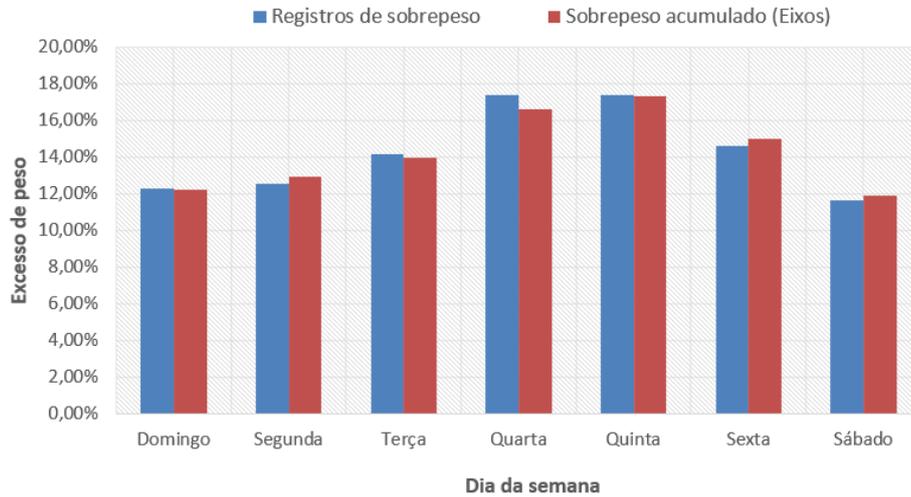


Fonte: Autor (2021)

Quando considerados os veículos com excesso no PBT, sem excesso nos eixos, o sobrepeso veicular se mostrou mais significativo nas quartas e quintas feiras.

A Figura 50 apresenta a distribuição desses mesmos índices, para veículos com sobrepeso nos eixos, exclusivamente.

Figura 50 – Registros de infração e sobrepeso acumulado nos eixos, por dia da semana (veículos com excesso nos eixos, exclusivamente).

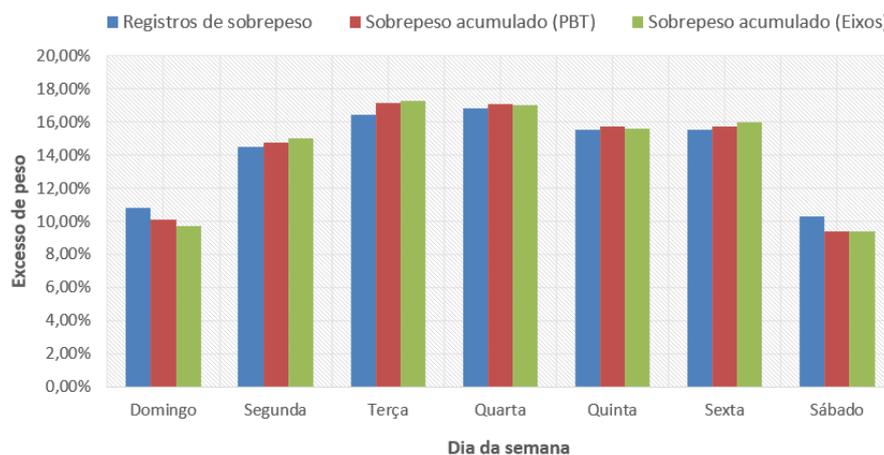


Fonte: Autor (2021)

Conforme mostra a Figura 50, nos veículos registrados com sobrepeso nos eixos, sem excesso no PBT, o sobrepeso veicular também se mostrou mais significativo nas quartas e quintas-feiras, de forma similar ao que foi observado na Figura 49.

Nesse mesmo contexto, a Figura 51 apresenta a distribuição dos excessos de peso, em função dos dias da semana, para veículos com sobrepeso no PBT e nos eixos, simultaneamente.

Figura 51 – Registros de infração e sobrepeso acumulado no PBT e nos eixos, por dia da semana (veículos com excesso no PBT e nos eixos, simultaneamente).



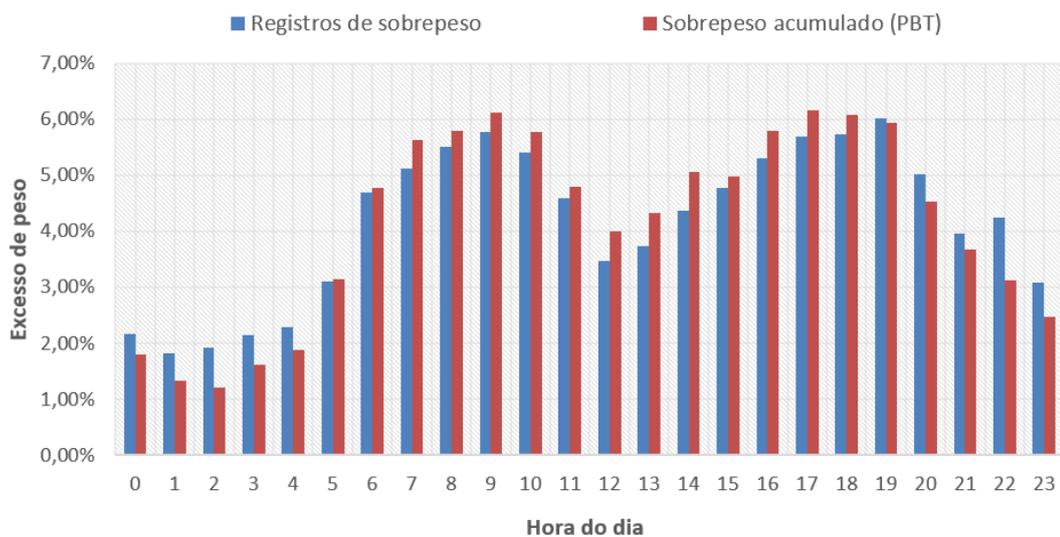
Fonte: Autor (2021)

Entre os veículos registrados com excesso no PBT e nos eixos (simultaneamente), o sobrepeso se mostrou relativamente equilibrado entre os dias da semana, com um leve aumento nas terças e quartas feiras e uma queda mais significativa nos fins de semana.

5.2.1.3 Análise do sobrepeso veicular por intervalo de hora do dia

A observação e tentativa de interpretação dos índices de excesso de peso, acumulados em função dos diferentes intervalores de hora de um dia, pode auxiliar a compreensão sobre em quais momentos o sobrepeso veicular ocorre de forma mais significativa, em determinado trecho ou rede viária. A Figura 52 apresenta essa distribuição, considerando os veículos registrados com excesso no PBT, exclusivamente.

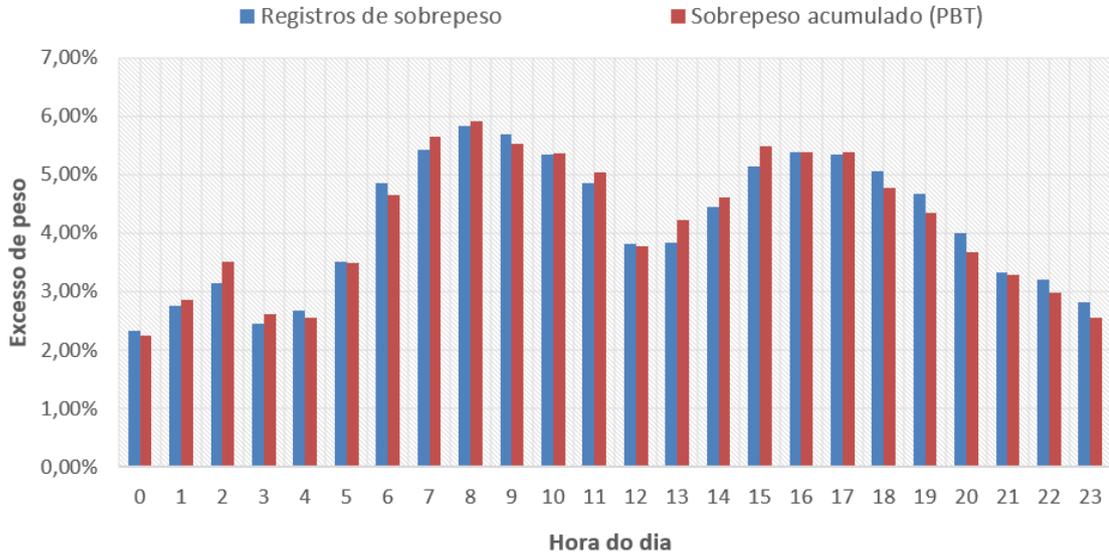
Figura 52 – Registros de infração e sobrepeso acumulado no PBT, por intervalo de hora do dia (veículos com excesso no PBT, exclusivamente).



Fonte: Autor (2021)

Conforme mostra a Figura 52, entre os veículos registrados com sobrepeso nos PBT, sem excesso nos eixos, o sobrepeso veicular se mostrou mais significativo nos horários comerciais, com picos entre 8:00h e 10:00h e entre 17:00 e 19:00.

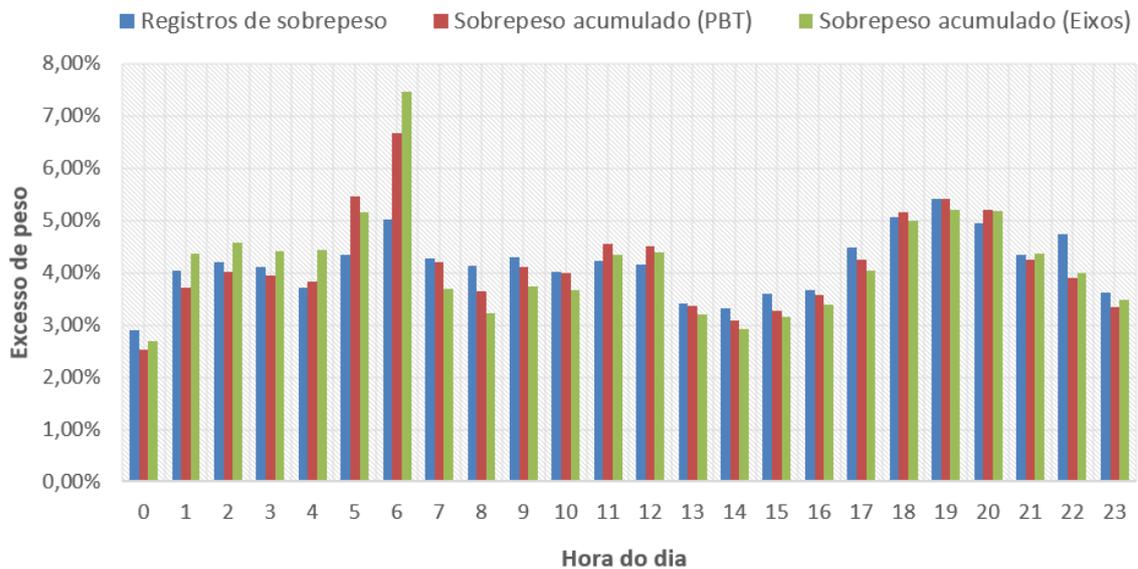
Figura 53 – Registros de infração e sobrepeso acumulado nos eixos, por intervalo de hora do dia (veículos com excesso nos eixos, exclusivamente).



Fonte: Autor (2021)

Na Figura 53, entre os veículos registrados com sobrepeso nos eixos, sem excesso no PBT, o sobrepeso apresentou uma tendência similar à observada na Figura 52, porém com um pequeno aumento durante a madrugada, entre 1:00h e 3:00h.

Figura 54 – Registros de infração e sobrepeso acumulado no PBT e nos eixos, por intervalo de hora do dia (veículos com excesso no PBT e nos eixos, simultaneamente).



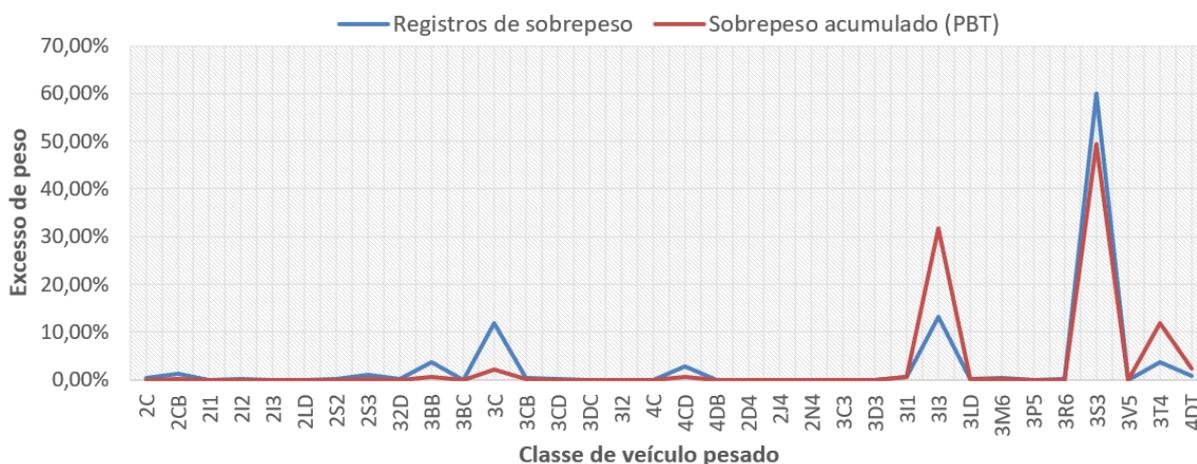
Fonte: Autor (2021)

No gráfico da Figura 54, envolvendo os veículos registrados com excesso no PBT e nos eixos (simultaneamente), o sobrepeso apresentou um pico entre o intervalo de 4:00h a 6:00h. no mesmo sentido, é possível observar que, nesses horários, há uma diferença acentuada entre o percentual de registros de sobrepeso e os percentuais de sobrepeso acumulado, o que indica que o sobrepeso é praticado por uma quantidade reduzida de veículos (menos veículos com sobrepesos mais severos).

5.2.1.4 Análise do sobrepeso veicular por classe de veículo pesado

A análise da distribuição do sobrepeso veicular em função das diferentes classes de veículos pesados torna possível a compreender sobre quais tipos de veículos o sobrepeso ocorre de forma mais significativa. Nesse contexto, a Figura 55 apresenta a distribuição dos índices de sobrepeso, por classe de veículo, considerando os registros de veículos com excesso no PBT, exclusivamente.

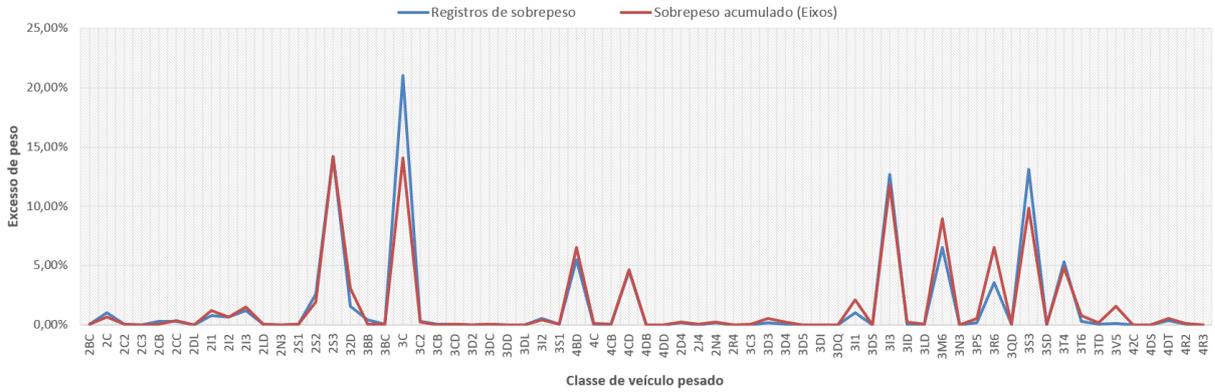
Figura 55 – Registros de infração e sobrepeso acumulado no PBT, por classe de veículo (veículos com excesso no PBT, exclusivamente).



Fonte: Autor (2021)

Para esse tipo de infração por excesso de peso (PBT, exclusivamente), há uma predominância entre veículos da classe 3I3 e 3S3 (ambos veículos de 6 eixos), que juntas representam mais de 70% do total de registros e mais de 80% do sobrepeso acumulado. Especificamente para a classe 3I3, há uma diferença notável entre a proporção de registros (linha azul) e a proporção de sobrepeso acumulado (linha vermelha), indicando a ocorrência de grandes excessos envolvendo esta classe de veículos.

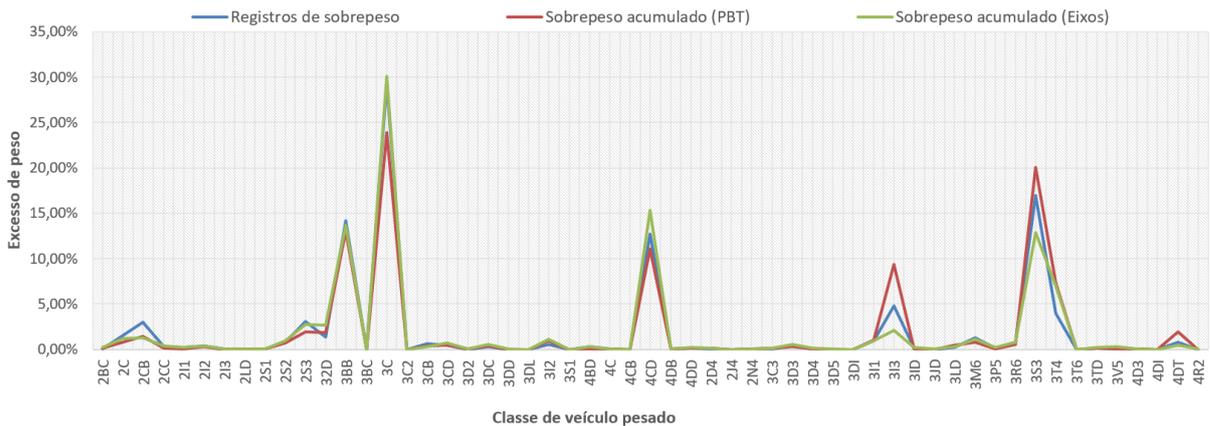
Figura 56 – Registros de infração e sobrepeso acumulado nos eixos, por classe de veículo (veículos com excesso nos eixos, exclusivamente).



Fonte: Autor (2021)

Na Figura 56, entre os veículos registrados com sobrepeso apenas nos eixos (exclusivamente, sem excesso no PBT), o sobrepeso apresentou mais distribuído entre diferentes classes de veículos, sendo elas de menor porte (lado esquerdo do gráfico) ou de maior porte (lado direito do gráfico).

Figura 57 – Registros de infração e sobrepeso acumulado no PBT e nos eixos, por classe de veículo (veículos com excesso no PBT e nos eixos, simultaneamente).



Fonte: Autor (2021)

Por fim, a Figura 57 apresenta a distribuição percentual de veículos registrados com excesso de peso no PBT e nos eixos (simultaneamente), entre as diferentes classes de veículos. Assim, verifica-se que esse tipo de infração ocorre para uma gama extensa de classe de veículos

e ocorre de forma mais severa entre as os veículos de pequeno e médio porte (até 5 eixos), de acordo com a classificação criada no presente método.

Os resultados obtidos nessa fase do processamento possibilitam a obtenção de uma visão geral sobre a prática do sobrepeso registrado, culminando em uma base de conhecimento para uma melhor interpretação das árvores de classificação desenvolvidas a seguir. Caso necessário, esses gráficos podem ser revisitados para prover uma compreensão mais específica sobre as informações sintetizadas nas árvores.

5.2.2 Classificação dos registros de excesso de peso

O principal resultado da fase de investigação do excesso de peso, no escopo do presente método, consiste na estruturação das árvores de classificação dos registros de sobrepeso. Como o sobrepeso de veículos pode ser associado a múltiplos fatores, as árvores de classificação são úteis pois permite que essas associações sejam acessadas de forma a combinar múltiplos atributos, sendo esses referentes à escala do excesso, aos intervalos temporais e às classes de veículos.

Considerando-se o contexto apresentado, foram desenvolvidas três árvores de classificação, mais uma vez em função do tipo de enquadramento dos registros de sobrepeso.

A Figura 58 apresenta o resultado da classificação dos registros de veículos com excesso de peso nos PBT, exclusivamente.

Figura 58 – Classificação de registros de excesso de peso no PBT, exclusivamente.

Quantidade de registros de excesso de peso		PBT apenas					
Excesso de peso acumulado no PBT (t)		30.549	57.107				
Meio da semana		Final e começo da semana					
17.112		13.437					
32.579		24.528					
Dia		Noite					
9.597		7.515					
19.805		12.774					
Dia		Noite					
8.264		5.173					
16.283		8.245					
Pequeno porte	Grande porte	Pequeno porte	Grande porte	Pequeno porte	Grande porte	Pequeno porte	Grande porte
1.580	8.017	2.035	5.480	1.497	6.767	1.452	3.721
524	19.280	723	12.052	503	15.780	513	7.732

Fonte: Autor (2021)

Conforme mostrado na Figura 58, há uma concentração de excesso de peso em veículos de grande porte trafegando durante o dia, principalmente no meio da semana. Dentre os 30.549 veículos registrados nesse enquadramento de excesso de peso, 8.017 (26,24%) possuía mais que 5 eixos, trafegava entre 6:00 e 17:59 e foi registrado entre segunda (após 12:00) e quinta-feira. Quando observado o excesso de peso acumulado, em toneladas, verifica-se que 33,76% do excesso de peso praticado por veículos com excesso apenas no PBT se concentra nesses mesmos atributos.

Na mesma conjuntura, a Figura 59 apresenta o resultado da classificação dos registros de excesso de peso nos eixos, exclusivamente (sem excesso no PBT).

Figura 59 – Classificação de registros de excesso de peso nos eixos, exclusivamente.

Eixos apenas															
≡ 54.361	⊗ 31.712														
Severo	Não severo														
≡ 31.926	≡ 22.435														
⊗ 28.499	⊗ 3.213														
≡ Quantidade de registros de excesso de peso															
⊗ Excesso de peso acumulado nos Eixos (t)															
Eixos apenas															
≡ 54.361															
⊗ 31.712															
Severo															
≡ 31.926															
⊗ 28.499															
Não severo															
≡ 22.435															
⊗ 3.213															
Meio da semana				Final e começo da semana				Meio da semana				Final e começo da semana			
≡ 17.469				≡ 14.457				≡ 12.444				≡ 9.991			
⊗ 15.384				⊗ 13.115				⊗ 1.767				⊗ 1.446			
Dia		Noite		Dia		Noite		Dia		Noite		Dia		Noite	
≡ 10.186		≡ 7.283		≡ 8.696		≡ 5.761		≡ 7.386		≡ 5.058		≡ 6.364		≡ 3.627	
⊗ 9.251		⊗ 6.133		⊗ 8.090		⊗ 5.025		⊗ 1.098		⊗ 669		⊗ 927		⊗ 519	
Pequeno porte	Grande porte	Pequeno porte	Grande porte	Pequeno porte	Grande porte	Pequeno porte	Grande porte	Pequeno porte	Grande porte	Pequeno porte	Grande porte	Pequeno porte	Grande porte	Pequeno porte	Grande porte
≡ 5.786	4.400	4.924	2.359	4.656	4.040	3.919	1.842	3.319	4.067	2.904	2.154	2.730	3.634	2.062	1.565
⊗ 4.433	4.818	3.660	2.473	3.581	4.509	2.995	2.030	400	698	340	330	336	592	251	268

Fonte: Autor (2021)

A interpretação dos resultados demonstrados na Figura 59 permite observar que há uma distribuição relativamente equilibrada entre as quantidades de registros de excesso de peso “severo” (58,73%) e “não severo” (41,27%), nesse tipo de enquadramento. No entanto, quando observado o excesso de peso acumulado em cada um desses agrupamentos de registros de veículos, verifica-se que 89,87% do excesso de peso praticado se concentra em veículos com excesso de peso “severo”, ou seja, veículos que estariam passíveis de serem retidos para remanejamento e/ou transbordo, de acordo com a legislação atual do Brasil.

Ainda entre os registros de veículos com excesso de peso nos eixos, sem excesso no PBT, verifica-se uma concentração do excesso de peso acumulado entre veículos de grande porte, trafegando durante dia e com excesso de peso severo. Assim, 29,41% do total de excesso de peso em toneladas, registrados em veículos com excesso exclusivo nos eixos, foram

detectados nessas circunstâncias, havendo uma predominância ligeiramente maior entre veículos registrados no meio da semana.

Por fim, ainda referente aos resultados obtidos na fase de processamento de dados HS-WIM, a Figura 60 mostra a classificação dos registros de excesso de peso por eixo e no PBT, simultaneamente, conforme o método estabelecido.

Figura 60 – Classificação de registros de excesso de peso no PBT e nos eixos, simultaneamente.

PBT e Eixos															
Quantidade de registros de excesso de peso															
Excesso de peso acumulado no PBT (t)															
Excesso de peso acumulado nos Eixos (t)															
Severo								Não severo							
Quantidade de registros de excesso de peso															
Excesso de peso acumulado no PBT (t)															
Excesso de peso acumulado nos Eixos (t)															
Meio da semana				Final e começo da semana				Meio da semana				Final e começo da semana			
≡ 6.969				≡ 5.518				≡ 18.827				≡ 15.075			
⚖ 33.464				⚖ 25.767				⚖ 37.910				⚖ 28.932			
⊖ 28.366				⊖ 21.949				⊖ 16.788				⊖ 13.355			
Dia		Noite		Dia		Noite		Dia		Noite		Dia		Noite	
≡ 3.018		≡ 3.951		≡ 2.570		≡ 2.948		≡ 9.080		≡ 9.747		≡ 7.872		≡ 7.203	
⚖ 14.926		⚖ 18.538		⚖ 12.301		⚖ 13.466		⚖ 19.373		⚖ 18.537		⚖ 15.426		⚖ 13.506	
⊖ 12.817		⊖ 15.549		⊖ 10.554		⊖ 11.395		⊖ 7.956		⊖ 8.833		⊖ 6.659		⊖ 6.696	
Pequeno porte	Grande porte	Pequeno porte	Grande porte	Pequeno porte	Grande porte	Pequeno porte	Grande porte	Pequeno porte	Grande porte	Pequeno porte	Grande porte	Pequeno porte	Grande porte	Pequeno porte	Grande porte
≡ 2.409	≡ 609	≡ 3.328	≡ 623	≡ 2.128	≡ 442	≡ 2.593	≡ 355	≡ 5.228	≡ 3.852	≡ 6.663	≡ 3.084	≡ 4.638	≡ 3.234	≡ 5.189	≡ 2.014
⚖ 10.210	⚖ 4.716	⚖ 13.892	⚖ 4.646	⚖ 8.938	⚖ 3.363	⚖ 10.852	⚖ 2.613	⚖ 6.890	⚖ 12.483	⚖ 8.777	⚖ 9.760	⚖ 5.999	⚖ 9.427	⚖ 7.265	⚖ 6.242
⊖ 9.130	⊖ 3.687	⊖ 12.286	⊖ 3.262	⊖ 7.883	⊖ 2.670	⊖ 9.440	⊖ 1.956	⊖ 4.935	⊖ 3.021	⊖ 5.975	⊖ 2.858	⊖ 4.067	⊖ 2.592	⊖ 4.703	⊖ 1.993

Fonte: Autor (2021)

Na Figura 60, verifica-se uma maior quantidade de registros de excesso de peso não severo (73,08%) em relação ao excesso de peso severo (26,91%). No entanto, quando considerado o excesso de peso acumulado em cada um desses agrupamentos de registros de veículos, observa-se que 62,54% do excesso de peso acumulado nos eixos e 46,98% do excesso de peso acumulado no PBT se concentra em veículos com excesso de peso severo. Essa situação permite inferir que, neste enquadramento, por mais que haja mais registros de veículos com excesso de peso "não severo", os excessos de peso "severos" são significativos o suficiente para quase igualarem (no caso do PBT) ou superarem (no caso dos eixos) o excesso de peso acumulado no agrupamento dos "não severos".

Ainda se tratando dos registros de veículos com excesso de peso no PBT e nos eixos, simultaneamente, verifica-se uma concentração do excesso de peso acumulado entre veículos de pequeno porte, trafegando durante a noite, com excesso de peso severo. Nessas

circunstâncias, foram registrados 19,63% do excesso de peso acumulado no PBT e 27,00% do excesso de peso acumulado nos eixos, havendo uma predominância entre veículos registrados no meio da semana.

As árvores de classificação dos registros de excesso de peso, resultante do processamento dos dados HS-WIM, permitem que sejam obtidas conclusões sobre a caracterização da prática de sobrepeso no local analisado. A partir da caracterização do excesso de peso, com base nos dados HS-WIM, os responsáveis pelo controle do excesso de peso no local passam a ter embasamento técnico para a formulação do desafio referente ao controle do excesso de peso, no qual são definidos os tipos e a escala do sobrepeso que se deseja controlar.

Para execução do processamento de dados HS-WIM no escopo deste trabalho, utilizou-se o ambiente de desenvolvimento Delphi e o sistema gerenciador de banco de dados livre *FireBird*. Em relação à linguagem de pesquisa padrão do banco de dados, utilizou-se *Structures Query Language (SQL)*. A tabulação dos registros de dados obtidos para o período estudado e a estruturação desses dados em um banco de dados resultou na base do ambiente de análise do projeto.

5.3 DEMONSTRAÇÃO DA FASE 3 - IDEALIZAÇÃO DE SOLUÇÕES PARA O EXCESSO DE PESO

A terceira fase do presente método tem como objetivo a idealização de soluções para o excesso de peso caracterizado no local. Nessa fase, além da criação de soluções baseada em evidências a respeito da prática do sobrepeso local, busca-se postergar o julgamento sobre a viabilidade de qualquer potencial solução de controle até a terceira fase do processo. Assim, a idealização das soluções para o excesso de peso ocorre a partir de uma definição clara sobre o desafio proposto, passando pela prospecção de todos os potenciais recursos para endereçamento desse desafio e culminando em um projeto preliminar de soluções para o excesso de peso, no qual todas as potenciais soluções são levadas em consideração.

A primeira etapa da fase de idealização de soluções para o excesso de peso consiste na formulação do desafio. Neste contexto, baseando-se na caracterização do excesso de peso realizada na primeira fase do método, esta etapa visa uma definição objetiva sobre o tipo e a escala do excesso de peso a ser controlado. Esse processo é demonstrado de forma hipotética a partir dos itens que seguem:

- a) Determinada organização responsável pelo controle do excesso de peso decide aprimorar seus meios de controle do sobrepeso, visando especificamente à coibição do excesso de peso por eixo, de forma a reduzir os índices de deterioração precoce do pavimento das vias.
- b) Por uma opção estratégica, a organização responsável pelo controle do excesso de peso não deseja concentrar seus esforços sobre veículos que praticam o excesso de peso de forma não severa, ou seja, veículos que seriam casos de liberação do remanejamento e/ou transbordo em uma situação de fiscalização.
- c) Ainda por uma opção estratégica, a organização opta por não direcionar seus recursos de controle aos veículos que trafegam com excesso de peso no eixo, mas que não excedem o limite PBT, por entender que esses transportadores não praticam o excesso de peso de forma intencional.
- d) Portanto, o desafio incidirá sobre o controle dos excessos de peso por eixo, que ocorrem em veículos com sobrepeso nos eixos e no PBT, simultaneamente. Os registros de sobrepeso nesse enquadramento concentram cerca de 72% do excesso de peso por eixo (em toneladas) acumulado no local.
- e) Considerando-se os resultados do processo de classificação dos registros de sobrepeso, os controles do excesso de peso deverão ser aplicados, prioritariamente, sobre veículos de pequeno porte, trafegando durante a noite, em qualquer período da semana.
- f) Considerando-se os resultados observados nos gráficos das Figuras 54 e 57, as ações de controle devem se concentrar em veículos da classe 3C e veículos que trafegam pelo ponto monitorado no intervalo de 4:00h a 6:00h.
- g) Assim, no escopo do desafio proposto, cerca de 27% do excesso de peso acumulado nos eixos, nesse enquadramento específico, será endereçado.

O presente método possibilita que a formulação do desafio seja realizada com base em evidências e que o controle do excesso de peso seja endereçado de forma a racionalizar os recursos disponíveis para essa função. No entanto, a definição dos tipos e escalas de excesso de peso que se deseja controlar ou reduzir pode ser feito com mais ou menos níveis de subjetividade, a depender das prioridades de cada organização responsável pelo controle do excesso de peso.

Ainda na segunda fase do presente método, executa-se a etapa de prospecção de recursos, na qual é realizada a identificação dos recursos potenciais e existentes que possam ser empenhados em atividades visando à redução ou o controle do excesso de peso no local analisado. A execução dessa etapa resulta em um quadro de soluções, classificadas em função do tipo de controle, do estágio de operação e dos níveis de flexibilidade e escalabilidade de cada solução. Uma vez formulado, o quadro de soluções para controle do excesso de peso de determinada organização pode ser reutilizado em diferentes ciclos da aplicação do método, sendo atualizado conforme resultados e observações da operação.

O Quadro 9 demonstra, de forma ilustrativa, uma situação hipotética com o resultado do processo de prospecção de recursos para os excessos de peso caracterizados com base na coleta e processamento de dados HS-WIM em Araranguá/SC.

Quadro 9 – Demonstração do quadro de recursos.

Tipo de controle	Recurso	Operação atual	Descrição
Fiscalização	Postos fixos de pesagem	Sim	Postos de pesagem localizados às margens da rodovia, com operação nos horários comerciais.
	Postos fixos com balança móvel	Não	Postos de pesagem localizados às margens da rodovia, com operação programada por demanda.
	Fiscalização móvel	Sim	Veículos equipados com balanças portáteis e operação programada por demanda.
Prevenção	Classificação de transportadores	Não	Sistema de ranqueamento de transportadores infratores com base no processamento de dados de pesagem coletados.

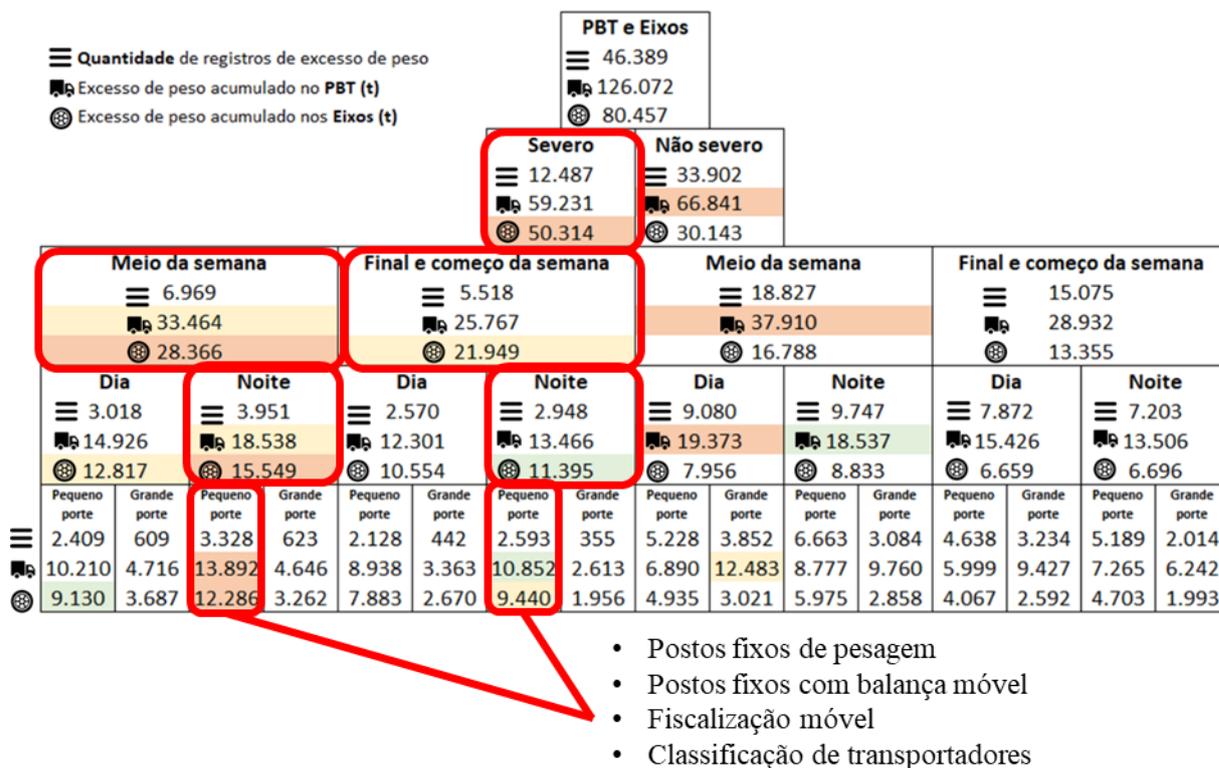
Fonte: Autor (2021)

Conforme demonstrado no Quadro 9, foram prospectados quatro tipos de recursos distintos para endereçamento do desafio proposto. Os recursos prospectados, de forma hipotética, condizem com os atuais tipos de soluções para controle do excesso de peso utilizados nas rodovias federais do Brasil.

A terceira fase do método se encerra com a concepção do mapa de alocação de recursos. Assim, o resultado esperado envolve o desenvolvimento de um mapa, contendo a representação visual da alocação dos recursos prospectados para controle do excesso de peso sobre as diferentes parcelas de sobrepeso que constituem o desafio formulado. O objetivo desse processo é possibilitar que os recursos apropriados sejam direcionados adequadamente para os tipos e escalas de excesso de peso que se deseja controlar. Considerando essa conjuntura, a

Figura 61 exibe o mapa de alocação de recursos, desenvolvido no escopo da presente demonstração do método.

Figura 61 – Demonstração do mapa de soluções.



Fonte: Autor (2021)

No mapa de soluções representado na Figura 61, o tipo de infração por sobrepeso que se deseja endereçar se refere aos casos em que o veículo apresenta excesso no Peso Bruto Total (PBT) e nos eixos simultaneamente. Nesse contexto, foram prospectados e direcionados quatro tipos de soluções distintas para controle e potencial redução do sobrepeso, nas circunstâncias em que essas infrações ocorrem de forma mais significativa e severa, conforme desafio formulado. Assim, a terceira fase do presente método se encerra com a prospecção de recursos e a sua alocação específica sobre as diferentes facetas do excesso de peso caracterizado no local onde o sistema HS-WIM foi instalado.

A prévia classificação e segmentação dos registros de excesso de peso em função das suas principais características permite que sejam idealizadas soluções especificamente apropriadas para cada parcela do excesso de peso que se deseja controlar. Nesse sentido, o julgamento sobre a adequabilidade de cada solução é postergado até o início da quarta fase, que

por sua vez culmina na definição do plano de implementação das soluções para controle do excesso de peso.

5.4 DEMONSTRAÇÃO DA FASE 4 - DEFINIÇÃO DE SOLUÇÕES PARA O EXCESSO DE PESO

Na quarta fase do método, o objetivo central é a definição de diretrizes para ações com potencial de reduzir ou controlar os índices de sobrepeso do local analisado. Essa fase do método resulta no plano de soluções para o controle do excesso de peso.

A definição das soluções de controle do excesso de peso ocorre a partir do agrupamento das ações idealizadas em grupos de implantação de curto, médio e longo prazo, em função dos índices de priorização calculados. O resultado, no contexto da presente demonstração, é mostrado no Quadro 10.

Quadro 10 – Demonstração da formulação do plano do soluções.

Solução	Operação atual	Flexibilidade	Escalabilidade	Prioridade	Plano de implantação
-	Sim	Sim	Sim	1	Curto prazo
Fiscalização móvel	Sim	Sim	Não	2	Curto prazo
-	Sim	Não	Sim	3	Médio prazo
Postos fixos de pesagem	Sim	Não	Não	4	Solução descartada
Classificação de transportadores	Não	Sim	Sim	5	Longo prazo
Postos fixos com balança móvel	Não	Sim	Não	6	Longo prazo
-	Não	Não	Sim	7	Longo prazo
-	Não	Não	Não	8	Longo prazo

Fonte: Autor (2021)

No Quadro 10, os níveis de priorização dos recursos prospectados na Fase 3 foram atribuídos de acordo com o *input* (hipotético) do usuário do método sobre a existência de operação atual, de flexibilidade e de escalabilidade em cada um dos quatro tipos de recursos idealizados. Nesse contexto, a fiscalização móvel foi considerada a única solução do plano de curto prazo, já que possuía operação atual e flexibilidade para ser alocada nos horários noturnos que compõem o desafio proposto. Os postos fixos de pesagem, por sua vez, foram descartados para o desafio proposto, uma vez que não possuíam flexibilidade ou escalabilidade.

O plano de implementação é projetado com base nos índices de priorização, e resultam em uma relação preliminar de potenciais soluções para controle do excesso de peso, agrupadas em função do tempo estimado de implantação de cada ação. A definição dos índices de priorização, que por sua vez direcionam a estruturação do plano de implementação, leva em consideração a existência dos recursos dentro da organização, a capacidade de flexibilização e/ou expansão desses recursos e o percentual de excesso de peso de se deseja endereçar.

O segundo processo desta última fase do método consiste em avaliar a aceitação do plano de implantação idealizado e ajustar esse plano conforme diretrizes e prioridades da organização responsável pelo controle do excesso de peso no local. Assim, elabora-se o plano de implantação definitivo para as ações de controle do excesso de peso.

O plano de implantação definitivo, além de ser aprovado pela organização responsável, deve demonstrar de forma clara as informações sobre o tipo, a escala e os atributos do excesso que se deseja controlar; além das ações de curto, médio e longo prazo associadas com cada parcela do excesso de peso considerada.

6 CONCLUSÃO

A elaboração da presente dissertação teve como principal resultado o desenvolvimento de um método com o potencial de contribuir com a efetividade das soluções para controle do excesso de peso de veículos rodoviários, a partir do processamento e da extração de conhecimentos de dados de pesagem em movimento em alta velocidade (HS-WIM). Além do método em si, o trabalho culminou em outras entregas específicas, que contribuem para o desenvolvimento do estado da arte e da prática, no que diz respeito ao controle do excesso de peso de veículos em rodovias.

A prática de sobrepeso em veículos rodoviários pode comprometer as boas condições de trafegabilidade das rodovias, a segurança dos seus usuários e a concorrência leal de transportadores e de embarcadores. Nesse sentido, destaca-se que o controle do sobrepeso veicular tende a se tornar mais complexo com o aumento da frota de veículos pesados e das rotas de tráfego, principalmente quando os recursos disponíveis para essa função não acompanham, proporcionalmente, esse crescimento. Portanto, o controle do excesso de peso de veículos se caracteriza como uma questão de interesse coletivo, que deve ser estudada e continuamente desenvolvida.

Através do capítulo intitulado “Conceitos e Referencial Técnico”, é fornecido um descritivo sobre as alternativas para controle do excesso de peso de veículos em rodovias mais difundidas no mundo, tanto no campo da fiscalização rodoviária, quanto nas áreas relacionadas à prevenção do excesso de peso. Ainda, são identificadas e documentadas as características e funcionalidades de sistemas de pesagem em movimento em alta velocidade, do inglês *High-Speed Weigh-in-Motion* (HS-WIM), e as suas aplicações até hoje implantadas para estratégias de controle do excesso de peso de veículos em rodovias.

O trabalho demonstra que os métodos mais tradicionais para controle do excesso de peso e incentivo à conformidade com os limites de carga de veículos envolvem a fiscalização dos limites de peso. Apesar da predominância da fiscalização como principal método para redução e controle do excesso de peso de veículos, outras alternativas, voltadas à prevenção do sobrepeso veicular, já foram empregadas ao redor do mundo.

Outro produto entregue através desta dissertação é a documentação do processo de execução e dos resultados de uma revisão bibliográfica sistemática acerca do estado da arte mundial em aplicações de conceitos relacionados à mineração de dados, para extração de conhecimentos de bases de dados HS-WIM. A documentação dessa revisão sistemática e as

conclusões obtidas a partir dos trabalhos selecionados para análise evidenciaram a base teórica sobre a qual o trabalho traz uma contribuição e forneceram *insight* para o desenvolvimento do método proposto.

A revisão sistemática bibliográfica realizada identificou trabalhos que envolvessem a aplicação de uma grande quantidade de dados de pesagem em movimento para a extração de conhecimentos relevantes para o aprimoramento do controle do excesso de peso de veículos. A partir desse objetivo, buscou-se identificar os principais trabalhos, publicados no âmbito internacional, nos quais técnicas e conceitos relacionados à mineração de dados fossem aplicados sobre bases de dados HS-WIM. Como resultado desse processo, as técnicas envolvendo o desenvolvimento de árvores de classificação sobre dados HS-WIM atraíram especial atenção, pois apresentaram uma forma resumida, visual e intuitiva de compreender grandes quantidades de dados HS-WIM, em função de múltiplos atributos.

Na sequência, o trabalho apresentou a sua principal entrega: a descrição detalhada do método de apoio à definição de soluções para controle do excesso de peso em veículos baseado no processamento de dados de tecnologias HS-WIM. O referido método foi estruturado com o intuito de tornar mais efetivas as soluções de controle do sobrepeso de veículos, através de processos que facilitam a compreensão sobre o excesso de peso local e a racionalização da aplicação de recursos para esse propósito.

A estrutura do método proposto é composta por cinco fases e um total de dez processos. A sequência das fases e processos é inspirada no modelo *Creative Problem Solving* (CPS). Assim como no modelo CPS, o método se inicia com uma fase divergente, através da qual realiza-se a busca por muitas, novas e diversas alternativas. A fase divergente é seguida por uma fase convergente, na qual realiza-se o afinamento, identificação e ou desenvolvimento das soluções mais promissoras para controle do excesso de peso registrado.

Por fim, realizou-se a demonstração da aplicabilidade do método desenvolvido, com a utilização doze meses de coleta ininterrupta de dados HS-WIM de um sistema instalado em condições nacionais brasileiras. Nesta demonstração, destaca-se a aplicação da técnica desenvolvida para processamento e para apresentação de dados HS-WIM, que permite a interpretação objetiva dos índices de sobrepeso registrados e o acompanhamento da sua evolução, visando promover os níveis de inteligência do controle do excesso de peso de veículos.

6.1 RECOMENDAÇÕES E SUGESTÕES PARA NOVAS PESQUISAS

Ao longo do desenvolvimento da presente dissertação, verificou-se que o controle do excesso de peso de veículos é uma atividade essencial, que possui múltiplas áreas passíveis de aprimoramento, mas que ainda não foram amplamente exploradas nos âmbitos científico e acadêmico. Nesse contexto, considerando-se especificamente a área de estudo do presente trabalho, que envolve a gestão da informação de peso de veículos para fins de controle do sobrepeso veicular, recomenda-se o desenvolvimento das seguintes pesquisas futuras:

- Desenvolvimento de modelos voltados à identificação da contribuição dos diferentes tipos e escalas de excesso de peso para a segurança do tráfego rodoviário.
- Desenvolvimento de modelos de associação entre a prática do excesso de peso e a deterioração precoce da infraestrutura viária, visando estimar o custo monetário da contribuição dos diferentes tipos e escalas de sobrepeso veicular para essa deterioração.
- Desenvolvimento de modelos que visam associar, de forma estimativa, as ocorrências de excesso de peso em veículos com os fatores de risco à fluidez do transporte rodoviário.
- Projeto e desenvolvimento de ferramentas computacionais para análise automatizada e para controle de qualidade de dados de pesagem em movimento.
- Desenvolvimento de modelos para estimativa de índices de excesso de peso futuros, a partir da interpretação de bases de dados históricos de sistemas HS-WIM.
- Desenvolvimento de técnicas para estimativa dos índices de sobrepeso em locais onde não há sistemas de coleta de dados em operação, a partir da associação entre padrões de tráfego de diferentes locais e rodovias, utilizando-se conhecimentos extraídos da coleta de dados por sistemas HS-WIM em longo prazo.
- Desenvolvimento de novos métodos voltados ao controle do excesso de peso de veículos, baseados em diferentes modelos de apoio a tomadas de decisão, tais como *Design Thinking* e *Analytic Hierarchy Process* (AHP).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AL-QADI, I. et al. LTBP program's literature review on weigh-in-motion systems. **United States Department of Transportation, Federal Highway Administration**, 2016.

ALCALÁ-FDEZ, J. et al. KEEL: A software tool to assess evolutionary algorithms for data mining problems. **Soft Computing**, v. 13, n. 3, p. 307–318, 2009.

ALCALÁ-FDEZ, J. et al. KEEL data-mining software tool: Data set repository, integration of algorithms and experimental analysis framework. **Journal of Multiple-Valued Logic and Soft Computing**, v. 17, n. 2–3, p. 255–287, 2011.

ASTM E 1318. Standard Specification for Highway Weigh-In-Motion (WIM) Systems with User Requirements and Test Methods. **ASTM Standard E 1318**, 2002.

BOSSO, M. et al. Use of regression trees to predict overweight trucks from historical weigh-in-motion data. **Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)**, 2019.

BURNOS, P.; GAJDA, J.; SROKA, R. Accuracy criteria for evaluation of weigh-in-motion systems. **Metrology and Measurement Systems**, v. 25, n. 4, p. 743–754, 2018.

CAMBRIDGE; FHWA. **Concept of Operations for Virtual Weigh Station**, 2009. Disponível em: <https://ops.fhwa.dot.gov/publications/fhwahop09051/virtual_weigh_stn.pdf>. Acesso em: janeiro de 2020.

COLEMAN, S.; CAI, D.; KONIDITSIOTIS, C. **Weigh-in-motion and ITS: Heavy vehicle on-board weighing using intelligent access program**. 19th Intelligent Transport Systems World Congress, ITS 2012. **Anais...2012**

DE CEUSTER, G. et al. Effects of Adapting the Rules on Weights and Dimensions of Heavy Commercial Vehicles as Established within Directive 96/53/EC. **Tren/G3/318/2007**, p. 1–315, 2008.

DENG, Y. et al. Predicting fatigue damage of highway suspension bridge hangers using weigh-in-motion data and machine learning. **Structure and Infrastructure Engineering**, 2020.

DNIT. **Anteprojeto de Posto Integrado Automatizado de Fiscalização - PIAF (Volume 4 - Operação)**. Brasília: 2014.

DNIT. **PIAF - Posto Integrado Automatizado de Fiscalização**, 2016. Disponível em: <<https://www.gov.br/dnit/pt-br/rodovias/operacoes-rodoviaras/pesagem/piaf>>. Acesso em: janeiro de 2020.

DNIT. **EDITAL PREGÃO Nº 0237/2017-00**, 2017. Disponível em: <http://www1.dnit.gov.br/anexo/Edital/Edital_edital0237_17-00_3.pdf> Acesso em: janeiro de 2020.

DOUPAL, E.; ADAMEOVA, Z.; KRIZ, I. Start of direct enforcement in the czech republic. **ICWIM7 7th International Conference on Weigh-in-Motion & PIARC workshop : Foz do Iguaçu**, 2016.

ECM. **Piezoelectric sensors Piezolor**, 2017. Disponível em: <<https://www.ecm-france.com/en/areas-of-activity/weigh-in-motion/piezoelectric-sensors-piezolor/>>. Acesso em: janeiro de 2020.

ESTRADAS. **Operação na BR-364, em Alto Garças(MT), fiscaliza caminhões com excesso de carga**, 2019. Disponível em: <<https://estradas.com.br/operacao-na-br-364-em-alto-garcas-mt-fiscaliza-caminhoes-com-excesso-de-carga/>>. Acesso em: janeiro de 2020.

FDOT. **Motor Carrier Size and Weight**, 2020. Disponível em: <<https://www.fdot.gov/maintenance/motorcarrier.shtm>>. Acesso em: janeiro de 2020.

FHWA. **Weigh-In-Motion Pocket Guide, Part 1: WIM Technology, Data, Acquisition and Procurement**, 2018.

FIORILLO, G.; GHOSN, M. Procedure for statistical categorization of overweight vehicles in a wim database. **Journal of Transportation Engineering**, v. 140, n. 5, 2014.

FIORILLO, G.; GHOSN, M. Minimizing illegal overweight truck frequencies through strategically planned truck inspection operations. **Journal of Transportation Engineering**, v. 142, n. 9, 2016.

FMCSA. **Working Together for Safety**, 2020. Disponível em: <<https://csa.fmcsa.dot.gov/>>. Acesso em: janeiro de 2020.

FRANCESCHI, L. et al. **Elaboração de um Processo Multicritérios para Apoio à Localização de Postos de Pesagem em Malhas Rodoviárias**. 33º Congresso Anual da ANPET. **Anais...**2019

FULLER, D.; BUOTE, R.; STANLEY, K. A glossary for big data in population and public health: Discussion and commentary on terminology and research methods. **Journal of Epidemiology and Community Health**, 2017.

GAJDA, J.; BURNOS, P.; SROKA, R. Accuracy Assessment of Weigh-in-Motion Systems for Vehicle's Direct Enforcement. **IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine**, v. 10, n. 1, p. 88–94, 2018.

GOOGLE. **Google Trends - Veja o que o mundo está pesquisando**. Disponível em: <<https://trends.google.com.br/trends/?geo=BR>>. Acesso em: janeiro de 2020.

GUERSON, L. et al. **Test-site for evaluation of high-speed WIM and ITS solutions in Brazilian conditions**. (Wiley, Ed.)7th International Conference on Weigh-in-Motion. **Anais...**Foz do Iguaçu: 2016

GUERSON, L. et al. **Brazilian National Program for Vehicle Overloading Prevention**. 8th International Conference on Weigh-in-Motion. **Anais...**Prague: Wiley, 2019

HANG, W.; XIE, Y.; HE, J. Practices of using weigh-in-motion technology for truck weight regulation in China. **Transport Policy**, v. 30, p. 143–152, 2013.

HIGGINS, J. P. T.; GREEN S. **Cochrane handbook for systematic reviews of interventions**, 2008.

HUANG, H. et al. Effects of Revised Toll-by-Weight Policy on Truck Overloading Behavior and Bridge Infrastructure Damage Using Weigh-in-Motion Data: A Comparative Study in China. **Advances in Civil Engineering**, v. 2019, 2019.

HYUN, K. et al. Truck body configuration volume and weight distribution estimation by using weigh-in-motion data. **Transportation Research Record**, v. 2478, p. 103–112, 2015.

JABLONSKI, B. et al. **Data mining to produce truck traffic inputs for mechanistic-empirical pavement design**. Proceedings, Annual Conference - Canadian Society for Civil Engineering. **Anais...**2010

JACOB, B.; COTTINEAU, L.-M. **Weigh-in-motion for Direct Enforcement of Overloaded Commercial Vehicles**. Transportation Research Procedia. **Anais...**2016

JACOB, B.; FEYPELL-DE LA BEAUMELLE, V. Improving truck safety: Potential of weigh-in-motion technology. **IATSS Research**, v. 34, n. 1, p. 9–15, 2010.

KARL, C. A.; KONIDITSIOTIS, C.; CAI, D. **Updates on the Australian intelligent access program**. 17th ITS World Congress. **Anais...**2010

KENYON, C. H. **A practical on-board weigh in-motion system for commercial vehicles**. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. **Anais...**1996

KISTLER. **Weigh In Motion - The key to sustainable road management and protection**, 2020. Disponível em: <<https://www.kistler.com/files/download/200-746e.pdf>>. Acesso em: janeiro de 2020.

LABTRANS. **Caderno 4: Modelo de Projeto Funcional de Posto de Fiscalização com Utilização de Sistemas de Pesagem HS-WIM**. Florianópolis: 2019.

LABTRANS; ANTT. **Manual com Protocolos Operacionais da Fiscalização com Agente Remoto**. Florianópolis: 2018.

LABTRANS; ANTT. **Modelo da Nova Arquitetura de Postos de Fiscalização da ANTT**. Florianópolis: 2018.

LABTRANS; DETRAN-ES. **Metodologia de Aplicação do Programa Voluntário de Monitoramento Logístico de Rochas Ornamentais**. Vitória: 2018.

LABTRANS; DNIT. **Levantamento de Sistemas de Pesagem em Movimento Existentes no Mundo**. Florianópolis: 2007 Disponível em: <<http://www.dnit.gov.br/rodovias/operacoes-rodoviaras/convenios-com-a-ufsc/tt-102-2007-fase-3.pdf%0A%0A>>. Acesso em: janeiro de 2020.

LABTRANS; DNIT. **Metodologia para Projeto, Construção e Implementação da Estação Integrada**. Florianópolis: 2015.

LABTRANS; DNIT. **Operação e Avaliação de Sistemas da Estação Integrada**. Florianópolis: 2017.

LAMAN, J. A.; NOWAK, A. S. Site-specific truck loads on bridges and roads. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Transport**, v. 123, n. 2, p. 119–133, 1997.

LEAHY, C. et al. **Estimating characteristic bridge traffic load effects using Bayesian statistics**. 12th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering, ICASP 2015. **Anais...**2015

LI, Q. et al. Mechanistic-empirical pavement design guide (MEPDG): a bird's-eye view. **Journal of Modern Transportation**, v. 19, n. 2, p. 114–133, 2011.

LI, Q. J. et al. Development of simplified traffic loading for secondary road pavement design. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 16, n. 2, p. 97–104, 2015.

LI, Q. J. et al. Traffic inputs for pavement ME design using Oklahoma data. **International Journal of Pavement Research and Technology**, v. 12, n. 2, p. 154–160, 2019.

MA, J. C.; KARL, C. A.; DYUKOV, A. **Certification and audit of the intelligent access program for the monitoring of heavy vehicles in Australia**. IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Proceedings. **Anais...**2009

MACANGUS, J. et al. **Speed characteristics on Manitoba's National Highway System roads using weigh-in-motion data**. 2012 TAC Conference and Exhibition - Transportation: Innovations and Opportunities, TAC/ATC 2012. **Anais...**2012

MOHER, D. et al. Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: The PRISMA statement. **Journal of Chinese Integrative Medicine**, v. 7, n. 9, p. 889–896, 2009.

MORALES-NÁPOLES, O.; STEENBERGEN, R. D. J. M. Large-scale hybrid Bayesian network for traffic load modeling from weigh-in-motion system data. **Journal of Bridge Engineering**, v. 20, n. 1, 2015.

MOSES, F. Weigh-in-Motion system using instrumented bridges. **ASCE Transp Eng J**, v. 105, n. 3, p. 233–249, 1979.

OPTIWIM. **New Generation of Dynamic Weigh-in-Motion**, 2019. Disponível em: <<https://www.optiwim.com/>>. Acesso em: janeiro de 2020.

OTTO, G. G. **Estudo da relação sensor-pavimento para aumento da precisão de sistemas de pesagem em movimento**. Tese de doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Florianópolis. 321, 2018.

PUCCIO, G. J. et al. A Review of the Effectiveness of CPS Training: A Focus on Workplace Issues. **Creativity and Innovation Management**, v. 15, n. 1, p. 19–33, 2006.

REIS, N. G. Verificação de peso por meio de nota fiscal. **Guia do Transportador Rodoviário de Cargas**, 2016.

ROH, H.-J. et al. Statistical Investigation of Truck Type Distribution on Cold Region Highways During Winter Months. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 22, n. 4, p. 1394–1405, 2018.

RONAY-TOBEL, B. et al. Weight Enforcement Network of Hungary. **ICWIM8 8th International Conference on Weigh-in-Motion**, 2019.

SAYYADY, F. et al. Axle load distribution for Mechanistic-Empirical Pavement Design in North Carolina. **Transportation Research Record**, n. 2256, p. 159–168, 2011.

SCHMIDT, F.; JACOB, B.; DOMPROBST, F. **Investigation of Truck Weights and Dimensions Using WIM Data**. Transportation Research Procedia. **Anais...**2016

SHINOHARA, K. . et al. **Brazilian PIAF model and the direct enforcement project**. 7th International Conference on Weigh-in-Motion. **Anais...**Foz do Iguaçu: Wiley, 2016

SIVAKUMAR, B.; SHEIKH IBRAHIM, F. I. Enhancement of bridge live loads using weigh-in-motion data. **Bridge Structures**, v. 3, n. 3–4, p. 193–204, 2007.

SJAARDA, M. et al. A systematic approach to estimating traffic load effects on bridges using weigh-in-motion data. **Stahlbau**, v. 89, n. 7, p. 585–598, 2020.

STERELA. **Weigh-in-Motion Advanced Solution Maker**, 2014. Disponível em: <http://www.scare.nc/wa_files/WIM_20SOLUTIONS_fr.pdf>. Acesso em: janeiro de 2020.

THE COCHRANE COLLABORATION. the Cochrane Reviewers' Handbook. **Database**, n. March, p. 1–32, 2001.

TRANFIELD, D.; DENYER, D.; SMART, P. **Towards a methodology for developing evidence-informed management knowledge by means of systematic review**. v. 14, p. 207–222, 2003.

TRIBUNAMT. **Excesso de carga: 15 mil carretas e caminhões fiscalizados na BR-163**, 2019. Disponível em: <<https://www.tribunamt.com.br/2019/04/18/excesso-de-carga-15-mil-de-carretas-e-caminhoes-sao-fiscalizados-na-br-163/>>. Acesso em: janeiro de 2020.

U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. **Comprehensive Truck Size and Weight Study**Transportation, 2000.

VAN LOO, H. **Strategies for Weight Enforcement using Weigh-in-Motion systems**. (DNIT, Ed.)Controle de Sobrepeso: Políticas e soluções tecnológicas. **Anais...**Brasília: 2015. Disponível em: <<https://www.gov.br/dnit/pt-br/rodovias/workshops/WorkshopPesagemS2HansLabTrans.pdf>>

- VAN LOO, H.; ŽNIDARIČ, A. **Guide for Users of Weigh-In-Motion - an Introduction to Weigh-in-Motion**. 1. ed. [s.l.] ISWIM, International Society for Weigh-in-Motion, 2019.
- VON ROSING, M. et al. Business process model and notation-BPMN. **The Complete Business Process Handbook: Body of Knowledge from Process Modeling to BPM**, 2014.
- WORLD HIGHWAYS. **Felix Scheuter, of Haenni Instruments, on effective highway weight enforcement**, 2013. Disponível em:
<<https://www.worldhighways.com/wh12/feature/felix-scheuter-haenni-instruments-effective-highway-weight-enforcement>>. Acesso em: janeiro de 2020.
- YOO, I. et al. Data mining in healthcare and biomedicine: A survey of the literature. **Journal of Medical Systems**, 2012.
- ZHANG, Y.; O'CONNOR, S. M.; LYNCH, J. P. **Automated data-driven load estimation of highway bridges using structural monitoring data**. SHMII 2015 - 7th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure. **Anais...2015**
- ZHOU, X. et al. **Applying weigh-in-motion traffic data to reliability based assessment of bridge structures**. Safety, Reliability, Risk and Life-Cycle Performance of Structures and Infrastructures - Proceedings of the 11th International Conference on Structural Safety and Reliability, ICOSSAR 2013. **Anais...2013**