



Relatório de Pesquisa Final

Estudo do Espectro de Cargas dos Veículos Comerciais rodantes na BR- 290/RS, Freeway, através do uso da técnica do Weigh-in-Motion (WIM)

Cliente: Concessionária da Rodovia Osório-Porto Alegre – CONCEPA

Documento N° 12-0020

Abril de 2013

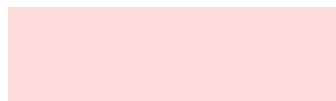
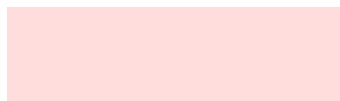
Relatório de pesquisa preparado por Prime Engenharia e Consultoria LTDA.

Rua Fernando Machado 805/103 – Porto Alegre/RS

CNPJ 10.446.085/0001-90



Preparado por: Lélío Brito e André Bock



A Prime Engenharia considera o conteúdo deste relatório correto até a data de sua edição. Assim, todo e qualquer tópico abordado que seja dependente de normatização e/ou legislação deve sempre ser verificado para a versão mais atual dos mesmos quando de consultas futuras a este relatório. Fatores como preço, custo, taxas, composições e outras variáveis regulatórias utilizados neste documento também devem ser consideradas como referência-base a data de sua edição.

Não se considera que este relatório seja exaustivo a todos os detalhes técnicos do conteúdo tratado, da mesma forma que não cobre todos os produtos e especificações disponíveis no mercado nacional e/ou internacional. Apesar de um cauteloso trabalho para certificar-se da precisão no assunto tratado, a Prime Engenharia não pode aceitar responsabilidade ou ser julgada por perdas ou danos causados pela utilização das informações contidas neste documento.



1 INTRODUÇÃO.....	10
1.1 RELEVÂNCIA E JUSTIFICATIVA DA PESQUISA.....	11
1.2 OBJETIVOS.....	13
1.2.1 Objetivos Gerais.....	13
1.2.2 Objetivos Específicos	13
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE SISTEMAS DE PESAGEM.....	14
2.1 SISTEMAS DE PESAGEM DE VEÍCULOS.....	14
2.1.1 Sistemas de pesagem estática.....	16
2.1.2 Sistemas de pesagem em movimento de baixa velocidade (LS-WIM).....	17
2.1.3 Sistemas de pesagem em movimento de alta velocidade (HS-WIM)	17
2.2 SISTEMAS WEIGH-IN-MOTION – TECNOLOGIAS ATUAIS.....	18
2.2.1 Descrição do sistema, utilização e vantagens	18
2.2.2 Principais desvantagens.....	20
2.2.3 Principais sistemas disponíveis no mercado	20
2.2.4 Precisão e fatores de erros internos e externos.....	24
2.2.5 Classificação dos sistemas de pesagem em movimento (ASTM)	25
2.3 UTILIZAÇÃO DE SISTEMAS WIM NO MUNDO E NO BRASIL.....	27
2.4 ESTADO DA PRÁTICA X ESTADO DA ARTE.....	31
3 ESPECTRO DE CARGAS - CONSIDERAÇÕES IMPORTANTES	33
3.1 IMPORTÂNCIA DA CARACTERIZAÇÃO DO TRÁFEGO.....	33
3.2 LIMITES DE CARGAS LEGAIS ADMISSÍVEIS (LEIS DE BALANÇA)	34
3.3 CLASSIFICAÇÃO DA FROTA CIRCULANTE	37
3.3.1 Classificação por eixo.....	38
3.4 CONSIDERAÇÕES DO ESPECTRO DE CARGAS NO DIMENSIONAMENTO	44
3.4.1 Definição do tráfego	45
3.4.2 Fatores de influência na estimativa do carregamento real do tráfego	50
3.5 IMPORTÂNCIA DO WIM PARA CARACTERIZAÇÃO DO TRÁFEGO	50
4 ESCOLHA DO SISTEMA DE WIM PARA IMPLANTAÇÃO	53
4.1 PREMISSAS CONSIDERADAS PARA ESCOLHA DO SISTEMA UTILIZADO	53



4.2	PESQUISA DE FORNECEDORES.....	54
4.3	VISITA A EMPRESAS FABRICANTES DO SISTEMA.....	56
4.4	VISITA AO CHECK-SITE DA VOSA.....	60
4.5	PARECER FINAL SOBRE A VISITA REALIZADA	65
4.5.1	RECOMENDAÇÃO PARA AQUISIÇÃO DO EQUIPAMENTO	65
5	IMPLANTAÇÃO WIM NA PISTA EXPERIMENTAL LAPAV/UFRGS.....	67
5.1	PISTA EXPERIMENTAL LAPAV/UFRGS- CARACTERÍSTICAS.....	67
5.2	SIMULADOR DE TRÁFEGO.....	69
5.3	EQUIPAMENTO DE WIM (SENSORES PIEZOELÉTRICOS)	71
5.3.1	Sensores para pesagem em movimento e sistema de aquisição de dados (ROADTRAX® BL PIEZOELECTRIC AXLE SENSOR & HI-TRAC® 100+).....	71
5.3.2	Recomendações de instalação	73
5.3.3	Necessidades especiais para instalação na pista experimental LAPAV/UFRGS	77
5.4	ETAPAS DE INSTALAÇÃO - PISTA EXPERIMENTAL LAPAV/UFRGS.....	78
5.4.1	Detalhamento da Instalação dos sensores WIM	78
5.4.2	Regulagem equipamento (serra) e cortes teste	78
5.4.3	Etapas de instalação dos sensores na pista experimental	80
5.5	CALIBRAÇÃO DO SISTEMA	88
5.5.1	Calibração do sistema de aplicação de cargas do Simulador de Tráfego.....	88
5.5.2	Definição dos níveis de carga a serem utilizados nos testes e fatores de influência nas leituras realizadas (temperatura)	90
5.5.3	Limites de aceitação e confiabilidade do sistema WIM	93
5.6	PRINCIPAIS RESULTADOS OBTIDOS NA IMPLANTAÇÃO WIM LAPAV/UFRGS	94
5.7	CALIBRAÇÃO SISTEMA WIM – ADEQUAÇÃO DO SOFTWARE	95
5.7.1	Influência da temperatura nos resultados obtidos	96
6	INSTALAÇÃO ONSITE DO SISTEMA WIM – BR 290/RS FREEWAY	99
6.1	LOCALIZAÇÃO E CARACTERÍSTICAS DA SEÇÃO DE TESTE	100
6.2	DETALHAMENTO DA INSTALAÇÃO DOS SENSORES WIM – BR-290/RS.....	103
6.2.1	Etapas Preliminares	104
6.2.2	Etapas de instalação dos sensores na pista experimental	105
6.2.3	Aspecto Final da instalação	113
6.3	OPERACIONALIZAÇÃO DO SISTEMA WIM INSTALADO NA BR 290/RS FREEWAY.....	114



6.4	PROCESSO DE CALIBRAÇÃO E AQUISIÇÃO DE DADOS.....	116
6.4.1	Precisão do sistema e Calibração dos sensores.....	116
6.4.2	Definição dos veículos e níveis de carga utilizados	119
6.4.3	Processo de calibração	121
6.4.4	Resultados do processo de calibração.....	127
6.5	RESULTADOS – DETERMINAÇÃO DO ESPECTRO DE CARGAS	128
6.5.1	Acesso Remoto ao Banco de Dados do Monitoramento	129
6.5.2	Análise do banco de dados formado durante o período de monitoramento (13/03/13 até 15/04/13)	130
6.5.3	Metodologia 1 – Classificação Default do software	131
6.5.4	Metodologia 2 – Classificação em função da quantidade de eixos e do distanciamento entre eixos dos veículos comerciais (DNIT).....	133
6.5.5	Comparativo entre as duas metodologias.....	134
6.5.6	Espectro de cargas - RESULTADOS.....	135
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	139
	ANEXO – PARECER CONSULTORES	143



LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Vantagens sistema WIM	11
Figura 2 - Sistemas de pesagem de veículos	15
Figura 3 - Cargas admissíveis por veículo - Limite legal por eixo	36
Figura 4 – Tipos de eixos de veículos rodoviários de carga brasileiros Fonte: DNIT (2006)	39
Figura 5 – Veículos adotados na classificação DNIT: Composições segundo Manual de Estudo de Tráfego do DNIT - Publicação IPR-723 (2006)	44
Figura 6 – Eixo Padrão Rodoviário (ESRD 8,2tf).....	46
Figura 7 – Fatores de equivalência de operação (DNIT).....	48
Figura 8 – Quadro de distribuição dos fatores de distribuição de eixos de carga no Guia da AASHTO 2004 (Software MEDPG)	52
Figura 9 - Fábrica da empresa TDC com sistemas HI-TRAC.....	57
Figura 10 - Sensor piezoelétrico Measurement Specialities e resina usada na instalação .	57
Figura 11 - Sistema TDC montado para operação com sensores Kistler a ser embarcado para cliente nos Emirados Árabes	58
Figura 12 - Sensor Lineas da marca Kistler; sensores de quartzo piezoelétrico	58
Figura 13 - Demonstração de um sistema WIM em funcionamento remoto da sede da TDC	59
Figura 14 - Sítio visita em Doxey - proximidades de Birmingham.....	62
Figura 15 - Vista aérea do sítio de Doxey utilizado para as operações de fiscalização	62
Figura 16 - Sensores instalados nas proximidades do sítio de Doxey.....	63
Figura 17 - Tela do sistema de alterna WIM&APNR da Vosa	64
Figura 18 - Pista experimental da Área de Testes de Pavimentos LAPAV/UFRGS	68
Figura 19 - Seção transversal da pista experimental.....	68
Figura 20 - Visão geral e detalhes do Simulador de Tráfego LAPAV/UFRGS.....	69
Figura 21 - Equipamento, sistema de aquisição de dados e informações técnicas.....	71
Figura 22 - Esquema de instalação dos sensores na pista experimental LAPAV/UFRGS	72
Figura 23 - Layout típico de instalação de sensores WIM.....	74
Figura 24 - Representação esquemática dos cortes para instalação dos sensores	74
Figura 25 - Sistema de centralização, alinhamento e fixação dos sensores dentro do corte de instalação através de ganchos específicos	75
Figura 26 - Selagem dos cortes após fixação dos sensores.....	76
Figura 27 – Realização de “cortes testes” em pavimento na área de testes	79
Figura 28 - Preparação do pavimento para instalação definitiva	79
Figura 29 – Pavimento limpo para demarcação dos locais de corte.....	80
Figura 30 - Marcação e pintura para instalação dos sensores	81
Figura 31 - Pintura concluída aguardando início dos cortes	81



Figura 32 - Realização dos cortes no pavimento	82
Figura 33 - Limpeza dos cortes e conferência de dimensões.....	82
Figura 34 – Gabarito para conferência das medidas dos cortes executados e espaçadores com dois tamanhos distintos (20mm e 25mm).....	83
Figura 35 – Embalagem com sensores piezoelétricos.....	84
Figura 36 – Preparação dos sensores para instalação	84
Figura 37 - Processo de instalação dos sensores	85
Figura 38 – Processo de instalação dos sensores.....	86
Figura 39 – Limpeza final dos cortes e revestimento.....	86
Figura 40 – Preparação do grout para selagem dos cortes.....	87
Figura 41 - Selagem dos cortes após instalação dos sensores	87
Figura 42 - Sistema de aplicação de carga.....	89
Figura 43 - Processo de calibração da unidade hidráulica do simulador de tráfego	89
Figura 44 – Curva de calibração do simulador de tráfego.....	90
Figura 45 - Esquematização da aplicação de carga	91
Figura 46 - Variação Sazonal da Temperatura Inverno - Verão	92
Figura 47 - Processo de calibração do sistema na pista de testes LAPAV/UFRGS	95
Figura 48 - Telas com as principais configurações do software de aquisição de dados no simulador de tráfego	96
Figura 49 - Variação das leituras em função da temperatura do pavimento	97
Figura 50 - Variação e dispersão das leituras em função da temperatura do pavimento ..	97
Figura 51 - Resultados para diferentes carregamentos	98
Figura 52 – Imagens da BR 290/RS – <i>Freeway</i>	99
Figura 53 – Localização da seção de testes (BR 290/RS - <i>Freeway</i>)	100
Figura 54 – Estrutura do pavimento dos trechos experimentais da BR 290/RS	101
Figura 55 – Representação esquemática da instalação do equipamento WIM	101
Figura 56 – Características técnicas dos sensores para implantação na <i>Freeway</i>	102
Figura 57 - Layout típico de instalação de sensores WIM	103
Figura 58 - Sistema de centralização, alinhamento e fixação dos sensores dentro do corte de instalação através de ganchos específicos (Fonte: Manual de instalação do fabricante)	103
Figura 59 – Sinalização e desvio do tráfego para realização da instalação dos sensores.	104
Figura 60 – Processo de regulação da profundidade de corte do equipamento	105
Figura 61 – Pavimento limpo para demarcação dos locais de corte.....	105
Figura 62 – Espaçamento dos sensores e laço indutivo	106
Figura 63 - Marcação e pintura para instalação dos sensores	106
Figura 64 - Esquema de instalação do sistema WIM em duas faixas de rolamento	107
Figura 65 - Realização dos cortes no pavimento	107
Figura 66 - Limpeza dos cortes e conferência de dimensões.....	108



Figura 67 – Gabarito para conferência das medidas dos cortes executados e espaçadores com dois tamanhos distintos (20mm e 25mm).....	108
Figura 68 – Embalagem com sensores piezoelétricos.....	109
Figura 69 – Preparação dos sensores para instalação	109
Figura 70 - Processo de instalação dos sensores	110
Figura 71 – Preparação do grout para selagem dos cortes.....	111
Figura 72 - Selagem dos cortes após instalação dos sensores	112
Figura 73 – Processo de acabamento do Grout	112
Figura 74 – Aspecto final após instalação do equipamento WIM.....	112
Figura 75 – Características gerais do site de implantação na BR 290/RS - Freeway	114
Figura 76 – Representação esquemática da instalação do equipamento WIM	115
Figura 77 - Esquema de instalação do sistema WIM em duas faixas de rolamento	116
Figura 78 – Esquematização de um método de calibração direta	119
Figura 79 - Veículos Teste utilizados no processo de calibração na rodovia	119
Figura 80 – Veículo de Teste 1: Caminhão Trucado (3C).....	120
Figura 81 – Veículo de Teste 2: Caminhão Trator+Semi-Reboque (2S3)	121
Figura 82 – Sinalização da pista para realização dos testes na rodovia.....	122
Figura 83 – Desvio do tráfego da rodovia para a realização dos testes de pesagem	122
Figura 84 – Preparação da pista para realização dos testes com o Veículo 1 (3C)	123
Figura 85 – Momento da passagem do Veículo 1 (3C) na seção de teste	124
Figura 86 – Aproximação e pesagem do Veículo 2 (2S3) na seção de teste.....	125
Figura 87 – Aproximação simultânea dos dois veículos de teste para pesagem em movimento na velocidade diretriz da rodovia	126
Figura 88 – Visão ampliada das condições da rodovia na seção de teste.....	126
Figura 89 – Local de instalação do sistema de pesagem em movimento	128
Figura 90 – Visão geral da seção de testes.....	129
Figura 91 - Tela do software online de acesso remoto ao sistema de pesagem WIM implantando na Rodovia BR-290/RS – Freeway e formato dos dados exportados	130
Figura 92 - Tela do banco de dados levantados com principais dados adquiridos.....	131
Figura 93 – Representação esquemática da composição do espectro de cargas segundo a classificação disponibilizada no equipamento (UK NCC 30)	132
Figura 94 – Representação da classificação dos veículos comerciais em função da quantidade de eixos e distanciamento entre os mesmos	133
Figura 95 – Análise Semana 1: Filtragem de veículos leves e comparativo entre as duas metodologias de classificação utilizadas	134
Figura 96 – Comparativo das duas metodologias para o grupo integral de dados	135
Figura 97 – Espectro de cargas segundo classificação UK NCC 30 - default	135
Figura 98 – Espectro de cargas em função do número de eixos e distanciamento (DNIT)	136



Figura 99 – Resultados comparativos para o grupo integral de dados – coleta contínua com veículos agrupados por número de eixos.....	137
Figura 100 – Distribuição normal dos resultados.....	137
Figura 101 – Análise para definição do percentual de carregamento	138
Figura 102 – Percentual de veículos com alguma sobrecarga em algum de seus eixos e percentual de sobrecarga neste eixo	138



1 INTRODUÇÃO

O presente projeto de pesquisa intitula-se “Estudo do Espectro de Cargas dos Veículos Comerciais rodantes na BR-290/RS, Freeway, através do uso da técnica do Weigh in Motion (WIM)”. O projeto se caracteriza pela implantação de um sistema de pesagem em movimento cujo principal objetivo é estudar a composição do espectro de cargas da frota de veículos comerciais rodantes na Freeway. Em adição, o estudo ainda promove uma discussão sobre a modernização da infraestrutura de fiscalização do controle de cargas pela inserção de uma nova tecnologia de pesagem, visando à possível futura melhoria da eficiência da malha da Concessionária, por agir com uma ferramenta de análise dos eixos de carga que rodam sobre a rodovia. Isto também facilitará estudos futuros no segmento do efeito dos carregamentos no dano dos pavimentos e, ainda, constituindo uma ferramenta de apoio à coibição dos excessos de carga futuramente.

O projeto é constituído de três focos principais, sendo que o primeiro serviu para a definição do sistema a ser utilizado para aquisição e análise dos dados coletados através da avaliação tecnológica dos os sistemas de pesagem disponíveis, incluindo aspectos operacionais, acurácia e confiabilidade. Estes aspectos impactam diretamente na usabilidade do sistema e segurança que o equipamento escolhido será compatível com o tipo de pavimento, características de tráfego e de tecnologia de informação disponíveis na Concessionária, assegurando que o projeto será capaz de entregar o seu produto final, a saber: amostragem do espectro de cargas para uma amostra de tráfego da Freeway no período de cinco semanas.

Já o segundo grande enfoque, refere-se à validação do equipamento nos aspectos técnicos e operacionais. Neta etapa foi realizada a instalação do equipamento em uma Pista Experimental na Área de Pesquisa e Testes de Pavimentos da UFRGS. Esta etapa permitiu que o sistema fosse estudado para uma implantação acurada no que se refere à sua instalação física para melhor funcionamento, e também calibração do sistema através do uso do Simulador de Tráfego do Laboratório de Pavimentação LAPAV/UFRGS, onde foram aplicadas cargas em movimentos para ajuste dos sensores e hardware de aquisição. Este período de investigação facilitou o estabelecimento de um protocolo de coleta de dados que garantiu a usabilidade dos resultados.

A implantação *onsite* na Freeway do sistema de pesagem em movimento permitiu a coleta de dados para amostragem do espectro de cargas. A localidade exata da instalação foi discutida com os técnicos da Concessionária, sendo que havia um indicativo que as proximidades do km70 da Pista Sul fossem apontadas como um lugar com características ideais. Posteriormente, definiu-se como sendo o local de implantação o km72+420, onde se dispõe de um pórtico contendo painel de mensagem variável (PMV) o que permitiu a conexão com o sistema de banco de dados da Concessionária através de fibra óptica.

A presença de um Posto de Pesagem Móvel no km65 foi importante para verificação da carga teste utilizada na calibração do equipamento e será importante posteriormente para eventuais verificações de cargas.

A fase final do projeto contempla justamente o acompanhamento, conclusões e sugestões do Projeto. É nela que foram compilados os dados obtidos, já previamente validados e o espectro de cargas discutido com uma equipe de Consultores externos para o melhor agrupamento das cargas existentes.

1.1 RELEVÂNCIA E JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

Esta pesquisa apresenta um caráter inovador, apesar de já haver alguns estudos desenvolvidos acerca da pesagem em movimento, não se teve acesso a informação de que haja no Brasil uma implantação plenamente funcional para o propósito de análise do amplo espectro das cargas rodantes nas rodovias Brasileiras. . A grande diferença para o tipo de equipamento a que esta proposta de pesquisa se propõe estudar está no fato de que a instalação não só apenas não ocorre em uma área de balança, mas também opera à velocidade operacional da via, no caso da Freeway 110 km/h.

A pesagem na velocidade operacional da via permite um constante monitoramento do tráfego viabilizando futuramente uma completa investigação dos eixos de cargas dos veículos que trafegam na rodovia (100% dos veículos) além de proporcionar economia do custo de transportes (evitando longas filas para pesagem – balanças fixas).

No Brasil, assim como nos principais países desenvolvidos, os sistemas de pesagem WIM são um enorme potencial, pois, permitem a fiscalização dos veículos diretamente no fluxo normal do tráfego da rodovia com as velocidades praticadas e sem necessitar de manobras de frenagem e aceleração, além do custo de implantação de um sistema ser relativamente baixo, quando comparado com os postos de pesagem existentes. Na Figura 1 é apresentado um interessante comparativo entre os sistemas de pesagens convencionais e o WIM.



Figura 1 – Vantagens sistema WIM

A constante mudança nos veículos no país, associado a crescente demanda de transporte de cargas, apresenta-se como um novo cenário bastante diferente daquele há alguns anos atrás. Neste contexto surge a importância do conhecimento do espectro de cargas rodantes em nossas rodovias, e a sua conformidade com a legislação em relação às cargas reais transportadas (controle de sobrepeso).



A não conformidade acarreta em consequências negativas bastante relevantes no que tange a vida útil dos pavimentos (degradação prematura), ao número e severidade dos acidentes envolvendo veículos comerciais de transporte, e à lealdade da concorrência.

Um dos últimos estudos desenvolvidos pela Concessionária CCR, intitulado “Avaliação da pesagem de veículos em movimento com cargas líquidas” utilizou-se de sensores de pesagem em movimento como aqueles utilizados em balanças seletivas para o processo. A grande diferença para o tipo de equipamento a que esta proposta de pesquisa se propôs a estudar está no fato de que a instalação não só apenas não ocorre em uma área de balança, mas também opera à velocidade operacional da via, no caso da Freeway 110km/h no potencial segmento de instalação. Isto permite um constante monitoramento do tráfego (24h/dia) viabilizando uma completa investigação dos eixos de cargas dos veículos que trafegam na rodovia.

A pesagem em movimento de veículos em alta velocidade (velocidade operacional da via) está sendo pesquisada por diversos órgãos internacionais para se tornar uma ferramenta automatizada do controle do transporte de cargas, além de proporcionar aos projetistas de pavimentos rodoviários importantes dados como volume de tráfego e horários de ocorrência, velocidade, classificação do veículo baseada no número e no espaçamento de eixos. Esse conjunto de informações futuramente podem ser considerados/incluídos em métodos de dimensionamento mais realistas/precisos proporcionando pavimentos menos suscetíveis à degradação prematura.

Relacionado ao custo de implantação de um sistema WIM, quando comparado à implantação de Posto de Pesagem, seja móvel ou fixo, o mesmo pode ser consideravelmente mais baixo e com o benefício de uma monitoração contínua e possibilidade de contenção de problemas apenas nos veículos potencialmente infratores, sem acarretar no desconforto daqueles que estão de acordo com as leis vigentes terem de arcar com o ônus do tempo necessário às operações de pesagem.

A proposta da presente pesquisa não apenas propõe a selecionar um equipamento com base nos estudos disponíveis, mas também de fato instalar e coletar dados em uma rodovia com alto volume de veículos e que foi capaz de fornecer um panorama atual dos níveis de cargas que hoje trafegam nas rodovias. Pois é de conhecimento do meio rodoviário, que os excessos de sobrecarga não apenas degradam o pavimento em velocidades aceleradas, causando a falha prematura de novos pavimentos ou reabilitações, mas também causam um grande risco operacional, levando muitas vezes a acidentes de grandes proporções.

Os dados coletados na presente pesquisa fazem parte de um importante banco de dados para melhor compreensão dos tipos de cargas que rodam numa das principais rodovias do estado, desenhando um cenário que até o presente momento é inferido com base em uma série de hipóteses; com a implantação deste sistema de WIM, tais hipóteses podem ser refinadas e novas diretrizes de projeto traçadas.

A instalação do sistema WIM por si só, já caracteriza um grande avanço no estudo do peso de veículos comerciais que hoje trafegam nas rodovias. Assim, a escolha do tipo de equipamento que foi utilizado, sua validação através do uso de um simulador de tráfego, a forma de coleta de dados e a classificação das faixas de peso destes veículos foram os principais produtos que esta pesquisa obteve.



1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivos Gerais

O objetivo geral desta pesquisa é estudar o espectro de carga que atualmente circula na rodovia BR-290/RS, trecho da Freeway, analisando as cargas de eixos dos veículos comerciais através da implantação de um sistema de pesagem em movimento de alta velocidade (weigh-in-motion WIM).

1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos desta pesquisa são:

- i. Coletar de fontes nacionais e internacionais os dados disponíveis sobre os tipos de equipamentos disponíveis para medição de WIM, fazendo considerações sobre a melhor tecnologia para implantação de um sistema piloto na BR-290/RS – Freeway.
- ii. Escolher um equipamento cujas características permitam a determinação do espectro de cargas rodantes na Rodovia BR-290/RS – Freeway.
- iii. Adquirir um equipamento WIM e instalar em uma Pista Experimental para validação do funcionamento do sistema e calibração do mesmo.
- iv. Escolher um segmento teste na BR-290/RS – Freeway e instalar um equipamento piloto em duas faixas de tráfego para coleta contínua pelo período mínimo de quatro semanas do espectro de cargas daquela rodovia.
- v. Escolha de uma metodologia para classificação do espectro de cargas com vistas ao armazenamento racional de dados para efeitos de estudos futuros.
- vi. Classificação do espectro de cargas dos veículos comerciais proveniente da coleta piloto realizada no segmento teste através do equipamento instalado.



2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE SISTEMAS DE PESAGEM

Neste capítulo será apresentada uma breve revisão sobre os sistemas de pesagem de veículos, como sistemas estáticos e especialmente dinâmicos “weigh-in-motion” (WIM), seus mecanismos de funcionamento, classificação, estado da arte e utilização atual no Brasil e no mundo. Os dados aqui apresentados são baseados em diversas bibliografias nacionais e internacionais sobre o assunto e pesquisas realizadas pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT e a Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC para a Identificação de Sistemas de Pesagem em Movimento, cuja pesquisa em nível nacional é que representa a mais abrangente até o momento.

Salienta-se, no entanto, a pesquisa visou, sobretudo, o estudo da parte eletrônica dos sistemas WIM, e não à coleta de dados do espectro de cargas como esta pesquisa se propõe. Aliás, é importante também atentar para o fato de a pesquisa ora desenvolvida não tem a audácia de desenvolver um novo sistema ou mesmo estudar a eletrônica dos componentes de um WIM, mas sim de encontrar um sistema já em funcionamento, validá-lo e coletar dados em uma rodovia em funcionamento. Ou seja, colocá-lo em prática para determinação do espectro de cargas rodantes da rodovia BR-290/RS, no trecho da Freeway.

2.1 SISTEMAS DE PESAGEM DE VEÍCULOS

De uma forma geral, qualquer sistema de pesagem para fiscalização de veículos comerciais rodoviários podem ocorrer de duas formas: na primeira, todos os veículos são fiscalizados através de postos de pesagem fixa ou móvel; na segunda, apenas os veículos potencialmente em desconformidade com os pesos máximos admissíveis são chamados para uma pesagem estática ou de baixa velocidade com o propósito de verificar a potencial infração. Constatada a não conformidade, é aplicada a penalidade prevista em Lei, e, nos casos previstos, o veículo é retido até que seja descarregado e removido o excesso de carga pelo operador.

Os sistemas de pesagem em movimento (weigh-in-motion - WIM), se propõem justamente a funcionar como selecionadores dos potenciais infratores no segundo tipo descrito anteriormente. Ocorre que a pesagem de toda uma frota de caminhões é onerosa tanto em aspectos de tempo - que hoje custam cada vez mais ao custo agregado de transporte - mas também para os órgãos responsáveis pela fiscalização.

Contrariamente aos sistemas de Pesagem em Movimento que podem de uma maneira automática de pesar os veículos e assim acusar os veículos com valores de carga por eixo ou total acima do limite, os postos de pesagem móvel por serem amostrais não conseguem muitas vezes coibir adequadamente esta prática abusiva de pesos no Brasil, já que se conhece uma série de artifícios utilizados pelo público transportador para evitar a fiscalização.

Já os postos fixos são bastante mais eficazes, mas, assim como os móveis, também requerem um desvio total dos veículos e filas acabam por se formar prejudicando a fluidez do tráfego.

Outra discussão importante, é o fato de que "os justos pagam pelos pecadores"; ou seja, transportadores que se enquadram dentro das prerrogativas legais, pagam pelo mesmo ônus de tempo e transtorno à pesagem pelo fato de ter que entrar na balança que via de regra representa algumas vezes em um atraso.

É por este fato e outros que o WIM vem sendo hoje apontado com uma potencial solução para este problema. Uma série de vantagens podem ser apontadas para o WIM:

- Infraestrutura mais barata do que a implantação de postos de pesagem
- Operação automática sem necessidade de agentes de pesagem
- Monitoramento contínuo com possibilidade de 100% do fluxo de veículos pesados
- Velocidade operacional da via; não há necessidade de desvios, nem de redução da velocidade dos veículos.
- Classificação dos veículos de acordo com seu espectro de carga para avaliação dos pavimentos.
- Custo de operação globalmente reduzido
- Gratificação aos transportadores não infratores que não precisam ser onerados com os gastos de tempo nas balanças fixas ou móveis.

Tradicionalmente, os sistemas de pesagem podem ser divididos em dois grupos: Pesagem Estática e Pesagem Dinâmica. No esquema da Figura 2 são apresentados os sistemas de pesagem e as suas principais subdivisões, além disso, nos itens a seguir são apresentadas breves considerações sobre cada um dos grupos e subdivisões.

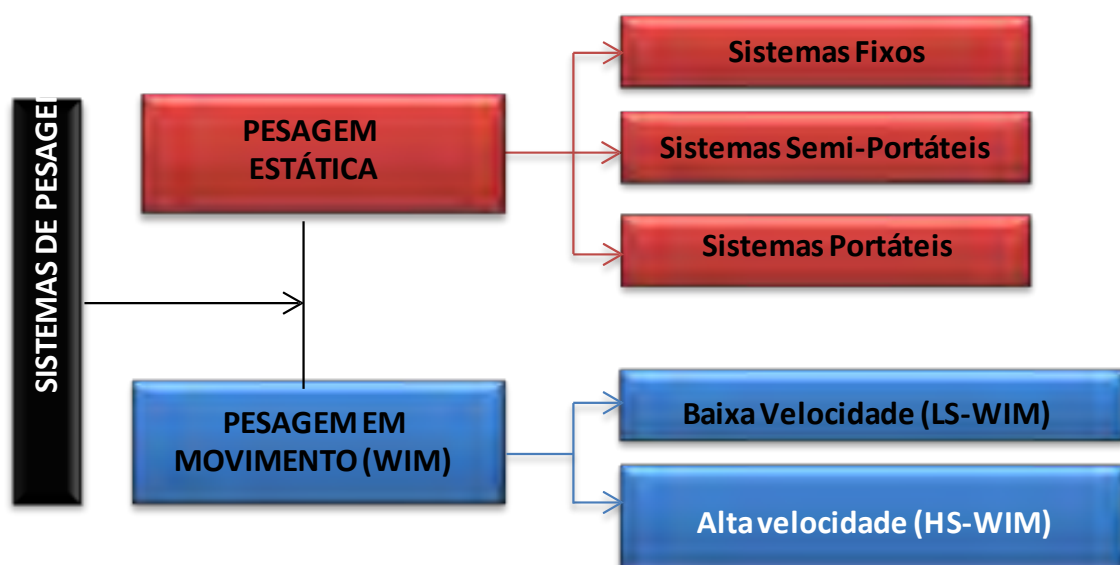


Figura 2 - Sistemas de pesagem de veículos



2.1.1 Sistemas de pesagem estática

Tradicionalmente os procedimentos de controle de carga são realizados através de sistemas de pesagem estática. Este foi o único método aprovado pela metrologia legal, até meados dos anos 1990 na maioria dos países.

São sistemas com alta participação humana e, conseqüentemente, baixos nível de eficiência e eficácia na fiscalização. Neste caso, a operação consiste na seleção visual por agente humano de veículos suspeitos. Estes veículos são comandados para fora do fluxo, e pesados em balança estática. Constatada a não conformidade, o veículo é retido no local até que seja emitida por agente notificação de multa, e, nos casos previstos, providenciado pelo transportador o descarregamento e remoção do excesso de carga.

São utilizadas balanças fixas de pesagem, balanças de rodas e eixos para medir o peso bruto do veículo, carga por roda ou por eixo. Quando são utilizadas balanças de eixo, o peso bruto total é obtido através da soma das cargas em cada eixo. Ao utilizar as balanças de rodas, a carga por eixo é obtida pela soma das cargas de rodas do mesmo eixo.

Basicamente existem três tipos de dispositivos de pesagem estática:

- **Sistemas fixos:** são permanentemente montados no pavimento, geralmente em estruturas ou plataformas de concreto;
- **Sistemas semiportáteis:** utilizam ranhuras permanentes e instalações na rodovia, mas são instaladas balanças portáteis apenas utilizadas durante as operações de fiscalização/pesagem;
- **Sistemas portáteis:** são sistemas de balanças de roda ou eixo que são colocadas na superfície do pavimento (em estacionamentos ou em qualquer área de pesagem), e complementadas com placas de nivelamento ou rampas, a fim de dispor de todas as rodas no mesmo nível e no mesmo plano durante a pesagem.

Os sistemas de pesagem estática sofrem com determinadas limitações, exigindo tempo e pessoal para a realização da pesagem, conforme descrito anteriormente. Com a utilização deste sistema de pesagem se torna difícil executar verificações precisas de carga em rodovias fortemente trafegadas e autoestradas. Com um elevado volume de tráfego, e o aumento de veículos pesados nas estradas, os sistemas de pesagem estáticos se tornam ineficazes atuando com um efeito bastante limitado.

Devido ao longo período de tempo requerido para a pesagem estática, quando vários caminhões são selecionados para verificação, a área de pesagem fica saturada, assim, outros caminhões sobrecarregados tem a possibilidade de passar livremente pelo posto de pesagem. Além disso, a pesagem estática implica em atrasos de 10 a 30 minutos (por vezes mais), o que penaliza os demais motoristas, incluindo a maioria que está na legalidade.



2.1.2 Sistemas de pesagem em movimento de baixa velocidade (LS-WIM)

Pelas razões descritas acima, e de modo a aumentar a eficiência das verificações, foi desenvolvido e implementado o conceito de pesagem em movimento, sistema este parcialmente automatizado. São sistemas com média participação humana e, consequentemente, médios nível de eficiência e eficácia na fiscalização.

Neste caso, a operação consiste no direcionamento de todos os veículos do fluxo a uma balança dinâmica de média/baixa velocidade, que automaticamente seleciona os veículos suspeitos de sobrecarga e, através de sinais de trânsito e painéis de mensagem variável, os direciona à pesagem em balança estática, ou dinâmica de baixa velocidade. Constatada a não conformidade, o veículo é retido no local até que seja emitida por agente humano notificação de multa, e, nos casos previstos, providenciado pelo transportador o descarregamento e remoção do excesso de carga.

Um software da aquisição de dados e sistema de processamento é concebido para analisar o sinal das células de carga, levando em conta a velocidade, para assim calcular com maior precisão as cargas por roda ou por eixo. Estes sistemas são instalados fora das pistas de tráfego, em áreas de pesagem, ou em postos de pedágio ou qualquer outra área controlada. A velocidade de funcionamento está geralmente entre 5 km/h e 15 km/h.

A *International Organization for Legal Metrology* (OIML, 2006) publicou uma recomendação internacional para a realização de testes de homologação deste tipo de sistema, e para certificar instrumentos de pesagem para veículos rodoviários, que se aplica a sistemas LS - WIM. O sistema LS- WIM é legalmente liberado para aplicação no Reino Unido desde 1978, bem como em vários Estados norte-americanos e canadenses além de províncias australianas. No final dos anos 1990 e início de 2000, vários países europeus (Alemanha, França, Bélgica, etc.) e o Japão autorizaram a utilização do LS- WIM. A precisão do LS - WIM pode ser de 3 a 5%.

2.1.3 Sistemas de pesagem em movimento de alta velocidade (HS-WIM)

Dada a tendência de crescimento do fluxo de carga rodoviária, e considerando a premissa de que o fluxo de veículos conformes seja minimamente perturbado, a eficiência e efetividade do sistema vai depender diretamente do grau de automatização empregado na fiscalização, neste contexto sistemas automatizados como os de pesagem em alta velocidade (HS - WIM) merecem destaque especial.

São sistemas com baixa participação humana e, consequentemente, altos nível de eficiência e eficácia na fiscalização. Neste caso, a operação do sistema consiste em pesar automaticamente todos os veículos do fluxo, na velocidade normal de operação, por meio de balança dinâmica de alta velocidade, instalada no pavimento ou sob pontes.

Detectada a não conformidade, o veículo e seu condutor são automaticamente identificados, por meio de análise de imagens, e incluídos num cadastro informatizado de infratores, com vistas à emissão automática de penalidade.



Dependendo da magnitude do excesso de carga, no próximo posto de polícia/pedágio, identificado por imagem como integrante do cadastro de infratores, o veículo é sinalizado para fora do fluxo, e, nos casos previstos, retido até que o descarregamento e remoção do excesso de carga seja providenciado pelo transportador.

Os sistemas de pesagem em movimento de alta velocidade (HS-WIM) são constituídos de uma série de sensores, instalados em uma ou mais faixas de tráfego, adquirem valores como volume de tráfego e horários de ocorrência, velocidade, classificação do veículo baseada no número e no espaçamento de eixos, cargas por eixo ou total do veículo enquanto estes estão viajando na velocidade normal no fluxo de tráfego. Sistemas HS- WIM permitem que todo tráfego que passam pela seção instrumentada seja monitorado, sem perturbação do fluxo de veículos na rodovia.

Como o objetivo desta pesquisa consiste em identificar e analisar o espectro de carga que atualmente circula na rodovia BR-290/RS, trecho da Freeway, sem perturbação do tráfego com coleta de dados na velocidade padrão da rodovia, foi este o sistema utilizado: um sistema de HS-WIM (Sistema de Pesagem em Movimento de Alta Velocidade).

2.2 SISTEMAS WEIGH-IN-MOTION – TECNOLOGIAS ATUAIS

Nos próximos itens serão apresentados os principais sistemas de pesagem em movimento, além de fatores como vantagens e desvantagens, atuais tecnologias empregadas e sistemas de aquisição de dados e classificação.

2.2.1 Descrição do sistema, utilização e vantagens

Os sistemas de pesagem em movimento, ou sistemas WIM, são capazes de estimar o peso total de um veículo e que parte desse peso é suportada (e, consequentemente, transmitida ao pavimento) por cada eixo ou grupo de eixos do veículo. Os sistemas de pesagem em movimento podem ser utilizados para pesagem em movimento a baixa velocidade ou a velocidade diretriz da via e para tanto utilizam diversas tecnologias compatíveis com suas funções.

Do ponto de vista dos sistemas de controle para pesagem com a utilização de equipamentos para pesagem em movimento, identificam-se como característica comum, os sensores, dos mais variados tipos, que devem ser instalados sobre a superfície da rodovia, abaixo da superfície da rodovia, inclui-se aqui também as obras de arte, ou ainda embutidos no pavimento.

Além destes, existem também os sensores que são colocados fora da rodovia, ou ainda nos “chassis” de veículos, que de alguma forma, também possuem propriedades de prover estimativas de carga de veículos comerciais.

As tecnologias de sensores mais utilizadas por sistemas WIM são: sensor de fibra ótica, tubo pneumático, “laços” indutivos (ILD), cabos piezelétricos, sensores magnéticos e sensores WIM (tais como piezelétrico, “bending plate”, célula de carga - load cell – e tapete capacitivo – “capacitance mat”), abordados a seguir mais detalhadamente.



Os sistemas de pesagem em movimento estão em funcionamento desde a década de 1980 e são hoje amplamente utilizados em todo o mundo. A pesquisa relativa aos sistemas WIM tem tido foco no desenvolvimento de melhores métodos de calibração, novos procedimentos, para aumento da velocidade de pesagem e novas tecnologias, em especial no que diz respeito aos sensores.

Torna-se necessária e de grande importância para o entendimento das tecnologias aplicadas na presente pesquisa fazer uma distinção entre os sistemas de pesagem em movimento de baixa velocidade (LS-WIM) e de alta velocidade (HS-WIM), sendo este último o sistema a ser utilizado para atingir os objetivos propostos nesta pesquisa.

Sistemas LS-WIM já são empregados largamente no controle da prática do excesso de cargas no transporte comercial rodoviário, seu uso no Brasil nesse controle não é novo, já em 1975 essa tecnologia foi selecionada para aplicação pelo Governo, no âmbito de um Plano Diretor de Pesagem.

Assim, em 1978 o primeiro de uma rede de postos de pesagem de veículos começou a operar, usando um sistema WIM do tipo bending plate para pré-seleção a 60 km/h, e um sistema WIM do tipo load cell para a fiscalização a 10 km/h.

A pesagem em movimento de veículos em alta velocidade vem se tornando um grande potencial, pois, permitem a fiscalização dos veículos diretamente no tráfego normal da rodovia com as velocidades praticadas e sem obrigar manobras de frenagem e aceleração, além do custo de implantação de um sistema ser relativamente baixo, quando comparado com os postos de pesagem existentes, além de aumentar a capacidade operacional dos postos de pesagem são frequentemente utilizados quando o tráfego intenso de caminhões não pode ser acomodado de outra maneira a não ser pelo artifício da pesagem em movimento.

Segundo Jacob (2002) as tecnologias HS-WIM podem ser usadas principalmente na:

- Engenharia de Pontes e Pavimentos, isto é, para obter os padrões de tráfego de carga que são utilizados como: (i) dados de projeto e para calibração de modelos; (ii) monitoramento de infraestrutura e avaliação, de fadiga ou de cargas extremas; (iii) inspeção e estratégias de reforço;

Proporcionam aos projetistas de rodovias um completo banco de dados sobre hora/volume de tráfego, velocidade, classificação do veículo baseado no número e no espaçamento de eixos, e o equivalente "Equivalent Standard Axle Load" (ESAL).

Mudanças nas tendências de tráfego podem ter impacto significativo na duração útil planejada das infraestruturas. É importante usar os melhores dados disponíveis localmente no projeto de pavimentos, uma vez que tais dados são específicos do local e mudam no tempo.

Pode-se obter com a utilização deste sistema um completo monitoramento das tendências de tráfego; monitoramento de mudanças significativas nos limites admitidos de veículos pesados em categorias de peso específicas; monitoramento do aumento do uso de certas rotas; e desenvolvimento de fatores apropriados de pista e distribucionais para instalações com várias pistas.



- Coleta de dados de tráfego, estatísticas sobre o transporte de mercadorias, pesquisas econômicas e, preços com base em cargas reais de tráfego e volume;
- Na triagem de veículos sobrecarregados antes de uma área equipada com verificação estática ou por dispositivos LS - WIM; uma pré-seleção com precisão no fluxo de tráfego aumenta amplamente a eficiência do controle e evita parar veículos legalmente carregados ou vazios.

2.2.2 Principais desvantagens

Apesar de suas grandes vantagens de utilização descritas anteriormente, os sistemas HS-WIM têm algumas limitações. A questão principal está relacionada com a precisão. A pesagem de veículos em movimento visa obter um valor estático (o peso do veículo) com o veículo em condição dinâmica.

Diversos fatores influenciam nessa medição, sendo os principais:

- Carregamento do veículo;
- A forma do sinal a ser processado;
- A suspensão, devido à interação dinâmica entre o veículo e a rodovia;
- A configuração do veículo (número de semirreboque, número de eixos);
- Uniformidade da superfície do revestimento e das características do pavimento;
- A velocidade de passagem;

Além disso, como os sensores são expostos ao completo volume de cargas de tráfego e estão montados na superfície do pavimento, eles podem ter um ciclo de vida limitado. Outra questão complicada é a calibração e avaliação de precisão do HS-WIM (Jacob et al. 2000, ASTM 2002). Todos estes fatores mencionados entram como uma variável no sistema e se o mesmo não está corretamente calibrado o nível de precisão é significativamente afetado, gerando resultados não coerentes com a realidade.

A calibração garante que o peso estático estimado pelo sistema WIM se aproxime do peso estático real. A calibração é responsável por levar em conta os efeitos e características específicas daquela instalação tais como temperatura do pavimento, velocidades dos veículos e condições do pavimento. Os procedimentos de calibração podem incluir uma fase do teste de aceitação e uma fase de recalibração.

2.2.3 Principais sistemas disponíveis no mercado

Conforme descrito anteriormente, os sistemas de pesagem em movimento podem ser utilizados para pesagem em movimento a baixa velocidade ou a velocidade diretriz da via e para tanto utilizam diversas tecnologias compatíveis com suas funções. As tecnologias de sensores mais utilizadas por sistemas WIM são “bending plate”, piezelétrico, célula de carga, tapete capacitivo e ótico. A seguir são apresentadas cada uma dessas tecnologias com o enfoque de uso do sistema na medição de carga dinâmica e estimativas de carga estática.



I. Sistema WIM bending plate

Sistemas WIM “bending plate” podem ser usados para coletar dados de tráfego e para controle de excesso de carga. Os mesmos utilizam placas com sensores de pressão presos no lado inferior. O sistema grava o esforço medido pelos sensores de pressão e calcula a carga dinâmica na medida em que o veículo passa sobre o “bending plate”. A carga estática é estimada usando a carga dinâmica medida e os parâmetros de calibração, sendo que os parâmetros de calibração consideram fatores, tais como, velocidade do veículo, tipo de pavimento, dinâmica da suspensão dos veículos, parâmetros esses que influenciam as estimativas de peso estático.

A acurácia dos sistemas WIM “bending plate” pode ser expressa em função da velocidade de passagem do veículo por sobre as placas, assumindo que o sistema é instalado numa estrutura isolada do resto da rodovia e sujeito as condições normais de tráfego. A acurácia desses sistemas é maior do que a dos sistemas piezelétricos convencionais e seus custos são menores do que os dos sistemas com células de carga, entretanto os sistemas WIM “bending plate” não são tão precisos quanto os sistemas “load cell” e são consideravelmente mais caros do que os sistemas piezelétricos.

II. Sistemas WIM piezelétrico

Os Sistemas WIM piezelétricos são compostos por um ou mais sensores piezelétricos, laços indutivos e sistemas de aquisição e tratamento de sinais. Os sistemas piezelétricos detectam uma variação na tensão causada pela pressão exercida no sensor pelo eixo e por meio disso mede a força de impacto que pode ser transformada em peso do eixo. Quando um veículo passa sobre o sensor piezelétrico, o sistema registra a saída de tensão do sensor e calcula a carga dinâmica.

Os materiais utilizados nos sistemas WIM piezelétricos são de quartzo, cerâmica e polímero e podem ser usados em intervalos maiores de velocidade que variam de 20 a 120 km/hora, dependendo do fabricante e da tecnologia empregada. Os sistemas WIM piezelétricos podem ser utilizados para monitorar várias pistas simultaneamente, sendo sua vida útil de 3 a 5 anos.

III. Sistema bridge WIM “ponte”

A tecnologia de sistema Bridge WIM “ponte” faz uso das obras de arte existentes em rodovias (ex: pontes, viadutos, etc.). Os sistemas Bridge WIM usam transdutores de pressão para transformar as deflexões dessas estruturas quando sujeitas a cargas móveis.

Geralmente, a acurácia na estimativa de peso estático de um sistema WIM “ponte” depende do procedimento de instalação (incluindo o tipo de ponte, a qualidade do ajuste e calibração dos parâmetros relacionados à transformação dos dados dos transdutores em peso), da rugosidade do pavimento (particularmente no que diz respeito às junções entre a rodovia e a obra de arte em questão) e, finalmente, da acurácia do procedimento de pesagem estática que serve como referência para estimativa do peso estático real.



Os componentes de hardware do sistema Bridge WIM não possuem avanços significativos na tecnologia de sensores e, por isso, podem ser considerados consolidados. Além disso, potenciais benefícios do sistema Bridge WIM incluem uma mudança de paradigma para calibração, uma vez que o próprio sistema traça as bases de sua calibração ao invés de, como em sistemas tradicionais, se basear em informações derivadas de algoritmos de computador para gerar curvas de calibração.

Outra vantagem é que para a instalação do sistema não é praticamente preciso interromper ou alterar o fluxo original de veículos da rodovia. Uma desvantagem do sistema é o uso de transdutores não calibrados, que limita o valor dos dados WIM para emprego e avaliações da estrutura por engenheiros.

IV. Sistema WIM com fibra ótica

Existem muitos tipos de sistemas que baseiam seus princípios funcionais em ótica. Os mais comuns são: sistema WIM baseado no interferômetro de Michelson, sistema WIM baseado em polarimetria com uso de fibra ótica e sistemas WIM baseados em sensores do tipo “microbend” óticos.

Os sistemas WIM baseados em fibra ótica apresentam ótima resistência à interferência eletromagnética causada pela estrutura de ferro de concreto Portland. Sua aplicação é especialmente considerada promissora em situações que requeiram um número maior de sensores, entretanto como ainda não é uma tecnologia consolidada, serão necessárias extensivas aplicações em campo visando demonstrar sua durabilidade, confiabilidade e seu desempenho operacional. Porém, um fato promissor apontado em experimentos com protótipos é a capacidade de alcançar elevadíssimos graus de acurácia.

V. Sistemas WIM com célula de carga

Um típico sistema WIM com célula de carga é composto de uma única célula de carga, no mínimo um laço indutivo e um sensor de eixo. A célula de carga possui duas balanças em linha que operam independentemente. Sensores colocados fora das balanças são integrados de forma a garantir que não seja pesado nada que está fora das superfícies destinadas à pesagem. Uma célula de carga possui barras de torções dentro da estrutura do sistema WIM de forma a transmitir todas as forças para a célula de carga. Esta célula de carga possui uma pequena porção de fluido que aciona um transdutor de pressão que por sua vez passa os dados para o equipamento de análise de dados, usualmente colocado na lateral da rodovia.

Os sistemas WIM com célula de carga são duráveis e estão entre os mais acurados sistemas WIM, podendo ser utilizado tanto para coleta de dados de tráfego como para controle de excesso peso, entretanto é o que necessita de maior investimento inicial e maior custo de manutenção. Além disso, o tempo de vida útil de um sistema WIM com célula de carga é de no máximo 5 anos.



VI. Sistema WIM com tapete capacitivo

O tapete capacitivo consiste de um sanduíche de lâminas de aço e de material dielétrico. Numa configuração uma lâmina de aço inoxidável é envolta pelo material dielétrico poliuretano em cada lado. As superfícies mais externas das camadas de poliuretano são fechadas por outras lâminas de aço inoxidável. Uma tensão alternada é aplicada através do sanduíche de materiais.

Quando um veículo passa sobre o tapete capacitivo, o espaçamento entre as placas diminui fazendo com que aumente a capacitância. Isto altera a frequência de ressonância do circuito elétrico do qual faz parte o tapete capacitivo. A frequência de ressonância, medida pelo equipamento de gravação e de análise de dados é então demonstrada ser proporcional ao peso do eixo. Sensores de tapete capacitivo podem ser usados em aplicações WIM portáteis bem como permanentes. Não são tão acurados para estimar peso quanto outros sistemas WIM e estão entre os sistemas WIM mais caros disponíveis.

VII. Sistema de Pesagem em Movimento com Múltiplos Sensores – MS-WIM

O Equipamento ou tecnologia com múltiplos sensores, usualmente referidas como MS WIM (“Multi-Sensors” WIM), se caracteriza pelo uso de diversos sensores e técnicas adequadas de processamento e de correlação para aferir ou executar um processo de “pesagem” em movimento. Sistemas de Múltiplos Sensores WIM independem da tecnologia utilizada pelos sensores, podendo inclusive utilizar sensores de tecnologias diferentes dentro de uma mesma configuração.

O emprego de múltiplos sensores WIM visa obter melhoria da acurácia, diminuir a dependência ao tipo de pavimento (isto é, impor menos restrições à “qualidade” do pavimento em que será utilizado o equipamento), diminuir a dependência ao tipo de veículo a ser “pesado”, aí incluídos os tipos de eixo e os tipos de suspensão, etc., diminuir a dependência ao “como” o veículo está sendo dirigido (fator humano), i.e., aos efeitos da frenagem, aceleração, velocidades, etc..

Desta forma, quatro vantagens da utilização de múltiplos sensores (ou de um Sistema MS-WIM) podem ser ressaltadas:

- Redução da dependência dos tipos e características do pavimento;
- Redução da dependência dos tipos e características dos sensores;
- Ampliação do uso de mesmos sistemas para diversas finalidades; e
- Facilitação nos processos de calibração e aferição.

Uma outra vantagem é que não se necessita, a priori, de um determinado tipo de sensor, sendo, a princípio, independente do tipo de sensor sendo utilizado. Esta característica faz com que esse tipo de sistema permita à autoridade responsável pelo controle do excesso de peso um leque maior de opções de fornecedores de sensores.

A principal desvantagem do sistema MS WIM é ainda a sua pouca utilização prática e a necessidade de ter-se que se ajustar e consolidar algoritmos eficazes para o processamento e tratamento dos dados bem como se adequar a forma de se realizar a calibração para diferentes condições infraestrutura e operação de pavimentos.



Considera-se que existe uma hierarquia de aplicações da tecnologia WIM, de complexidade crescente, com pelo menos três níveis:

- **Nível 1:** coleta contínua de dados de peso da população de veículos, para dar suporte estatístico a estudos nas áreas de planejamento e projeto, entre outros;
- **Nível 2:** pré-seleção dos veículos com maior probabilidade de estarem sobrecarregados, para aumentar o foco da fiscalização, e identificação de fatores sistemáticos da prática de sobrepeso, para possibilitar ações preventivas, de solução de problemas;
- **Nível 3:** fiscalização direta, aumentando enormemente a percentagem do fluxo de veículos monitorada (chegando até a 100% dos veículos), a percentagem de veículos sobrecarregados detectados, e o número de veículos sobrecarregados multados.

A estes níveis, correspondem requisitos de acurácia e confiabilidade também crescentes, que, no entanto, dependem fortemente do microperfil do pavimento aonde está instalado o sistema (e da dinâmica dos veículos).

Neste contexto, a metodologia MS-WIM (ainda em desenvolvimento), usando múltiplos sensores, é a que tem mais chance de permitir, em futuro próximo, que se controle estes indicadores de qualidade do sistema de medida, variando-se, em função das condições do pavimento, a tecnologia e/ou o número e/ou o leiaute dos sensores de peso usados.

2.2.4 Precisão e fatores de erros internos e externos

A precisão dos sistemas WIM é função de quatro principais fatores:

- Dinâmica do veículo;
- Integridade, composição e projeto do pavimento;
- Variância inerente no sistema WIM; e
- Calibração.

A dinâmica do veículo é dependente da rugosidade da superfície da rodovia, tipo de suspensão do veículo, balanceamento dinâmico do veículo, peso do veículo, velocidade do veículo, manobras do motorista, etc. Embora a instalação dos sistemas WIM tenha sido feita em pavimentos de boa qualidade, algumas vezes ocorrem deterioração inesperada ou anomalias estruturais.

A seguir serão descritos alguns fatores que podem provocar erros nos sistemas. O erro em qualquer equipamento de pesagem de veículos é a diferença entre o peso indicado e o “peso estático real”, o qual é definido como o peso sob condições controladas e perfeitas, significando com isto, entre outras coisas, que o local da balança está absolutamente nivelado, que a suspensão do veículo está numa posição de repouso e não apresenta atrito de qualquer natureza, o veículo não está acelerando nem desacelerando.

A diferença entre a indicação do sensor e a carga aplicada é caracterizada pelo chamado erro intrínseco do instrumento. Já a diferença entre a carga aplicada e o “peso estático



real” em outras condições, que não as controladas como anteriormente dito, pode ser chamada de erro devido aos “fatores externos”.

i. Erros devidos a fatores internos

O erro intrínseco pode ser determinado usando-se uma máquina de teste ou um peso (ou carga) padrão. Dependendo da tecnologia, ele pode ser mais ou menos influenciado por fatores tais como a temperatura, carga com característica excêntrica (desequilibrada), inclinação, curvatura, forças laterais, repetibilidade, aquecimento, umidade, susceptibilidade eletromagnética, etc.

Equipamentos utilizados para aplicação de lei devem, usualmente, ter seu modelo aprovado (aprovação de tipo - “type approval”) por organizações competentes e oficialmente incumbidas desta missão (no Brasil, INMETRO e seus agentes credenciados). Devem também ser individualmente testados antes de entrar em operação (aprovação pré-operação ou inicial).

ii. Erros devidos a fatores externos

Existem inúmeros fatores externos que podem provocar erros de leitura nos equipamentos de pesagem, dentre eles podemos citar:

- Inclinação do veículo;
- Suspensão do veículo, atrito (friccional) na suspensão;
- Reação à frenagem e movimento oscilatório dos veículos (chassis e eixos)
- Frisos dos pneus;
- Forças aerodinâmicas;
- Instalação dos sensores (nivelamento);
- Rugosidade e planicidade do pavimento.

2.2.5 Classificação dos sistemas de pesagem em movimento (ASTM)

As classes com as categorias dos sistemas de pesagem em movimento conforme a normatização ASTM E1318-02 são apresentadas a seguir.

As categorias de sistemas WIM são listadas na Tabela 1 juntamente com a aplicação e os dados disponibilizados pelos sistemas de cada classe (ASTM E1318- 02, 2002).

Uma descrição dos quatro tipos de classificação possíveis é apresentada a seguir:

- **Tipo I:** classifica os sistemas instalados em rodovias de um ou mais pistas com finalidade para a contagem e classificação de veículos. Armazena as seguintes informações: carga por roda, carga por eixo, carga por grupo de eixo, peso bruto total, velocidade, espaçamento entre eixos, classe do veículo, identificação do posto, pista sentido e direção, data e hora, número sequencial de registro, distância entre eixos (+distantes), ESAL, código da infração;



- **Tipo II:** classifica os sistemas instalados em rodovias de um ou mais pistas com finalidade para a contagem e classificação de veículos. Armazena as mesmas informações do tipo I, exceto pelo item carga por roda;
- **Tipo III:** classifica os sistemas instalados em rodovias com um ou mais pistas onde se deseja realizar procedimentos de pré-seleção de veículos, com identificação da aceleração. As informações como classe do veículo, distância entre eixos (+ distantes) e ESAL não são necessárias;
- **Tipo IV:** classifica os sistemas instalados em rodovias com um ou mais pistas onde se deseja realizar a fiscalização das cargas dos veículos que trafegam em velocidades de 3 a 16 km/h. Contém as mesmas informações do tipo III, porém com carga por eixo.

A Tabela 2 apresenta os requisitos de desempenho funcional dos sistemas WIM conforme definidos pela ASTM (ASTM E1318-02, 2002).

Tabela 1 – Categorias de Sistemas de pesagem em movimento (ASTM E1318-02)

Descrição do item	Classes ou Categorias			
	Tipo I	Tipo II	Tipo III	Tipo IV
Velocidade	16 a 130 Km/h	16 a 130 Km/h	16 a 130 Km/h	3 a 16 Km/h
Aplicação	Dados Coletados	Dados Coletados	Dados Coletados	Dados Coletados
Carga por roda	•		•	•
Carga por eixo	•	•		•
Carga por grupo de	•	•	•	•
Peso bruto	•	•	•	•
Velocidade	•	•	•	•
Espaçamento entre	•	•	•	•
Classe do veículo	•	•		
Identificação do posto	•	•	•	•
Pista/sentido de direção	•	•	•	
Data e hora	•	•	•	•
Nº Sequencial de	•	•	•	•
Distância entre eixos (+	•	•		
ESAL	•	•		
Código da infração	•	•	•	•
Aceleração			•	•



Tabela 2 – Requisitos de desempenho de sistemas WIM (ASTM E1318-02, 2002)

Função	Tolerância (95% de probabilidade)				
	Tipo I	Tipo II	Tipo III	Tipo IV	
				Kg	±Kg
Carga por roda	± 25%	-	± 20%	2300	± 100
Carga por eixo	± 20%	± 30%	± 15%	5400	± 200
Carga por grupo de eixos	± 15%	± 20%	± 10%	11300	± 500
Peso bruto	± 10%	± 15%	± 6%	27000	± 1100
Velocidade	± 2 km/h				
Espaçamento entre eixos	± 0,15 m				

A acurácia dos sistemas WIM é função de quatro principais fatores conforme descrito anteriormente, ou seja, dinâmica do veículo; integridade, composição e projeto do pavimento; variância inerente no sistema WIM e calibração. A Tabela 3 fornece alguns valores típicos para a acurácia para sistemas WIM.

Tabela 3 - Valores típicos de acurácia (intervalo de confiança $\pm 1\sigma$)

Tecnologia de Pesagem em Movimento	Acurácia na medida de carga por grupo de eixos	Acurácia na medida do peso bruto total
Cabo Piezelétrico	12%	10%
Sensor de Quartzo	10%	8%
“Bending plate”	3%	2%
Célula de carga	2%	1%

2.3 UTILIZAÇÃO DE SISTEMAS WIM NO MUNDO E NO BRASIL

A tecnologia de pesagem em movimento (WIM) é normalmente associada à tecnologia de vídeo é usada tanto na Europa quanto nos Estados Unidos (mais recentemente), para dar suporte à fiscalização na pré-seleção de veículos suspeitos para a fiscalização móvel, e na programação desta atividade.

Esta tecnologia serve ainda a uma abordagem proativa ao controle do sobrepeso, na Europa, através da identificação de características sistemáticas da prática de sobrepeso, a serem foco de atividades preventivas, e nos Estados Unidos, permitindo a oferta de serviços de dispensa automática da fiscalização em estações fixas.



Na Europa, no que tange à fiscalização, a tecnologia WIM é usada predominantemente para dar suporte: à pré-seleção de veículos, em tempo real, para a fiscalização móvel; à programação desta atividade, e; à adoção de ações preventivas, através da identificação de características sistemáticas da prática de sobrepeso (empresas, motoristas, tipos de empresas, veículos ou carga, etc.).

De uma forma geral, os países europeus têm favorecido uma abordagem estatística da fiscalização de peso, com poucas instalações fixas e muitas instalações móveis. Além disto, múltiplas aplicações dos dados gerados no contexto da fiscalização concorrem para favorecer ainda mais a relação benefício/custo dos sistemas instalados.

Outro aspecto geral importante, é que o contínuo aperfeiçoamento em tecnologia e procedimentos destes sistemas de fiscalização é objeto de programas pan-europeus permanentes, e de grande envergadura, com alocação de fundos importantes da Comunidade Europeia.

Na Suíça, por exemplo, utiliza-se ao longo das principais estradas foram instalados sistemas de pesagem em movimento, usando dois sensores tipo piezo-quartzo e um laço indutivo. Estes permitem pré-selecionar veículos suspeitos, que são escoltados pela polícia até o posto fixo de pesagem mais próximo onde peso e dimensões são aferidos. Confirmada a infração, a multa é aplicada, e o veículo retido até que o responsável realize o transbordo da carga e/ou regularize suas dimensões.

Além de usar tecnologia WIM para dar suporte à pré-seleção, os holandeses usam dados históricos de pesagem WIM para programar hora e local da fiscalização. Utilizando dados da semana mais recente, e das seis últimas semanas, são determinados a hora, o dia da semana e os locais de maior atividade de veículos sobrecarregados.

A tecnologia WIM está sendo amplamente usada para dar suporte ao controle de dimensões e peso dos veículos de carga na França. Sistemas WIM de alta velocidade (HS-WIM) estão sendo usados na pré-seleção em tempo real dos veículos a serem submetidos à fiscalização, no planejamento do dia, hora e local das atividades de fiscalização, e na prevenção, identificando transportadores ou motoristas reincidentes para receber cartas de advertência e visitas da fiscalização.

Os franceses se utilizam do histórico da pesagem WIM pré-seletiva para auxiliar na programação do dia, hora e local das atividades de fiscalização móvel.

Uma vasta e ampla revisão sobre os vários equipamentos utilizados foi feito na pesquisa UFSC/DNIT, na qual vários países foram visitados no continente Europeu:

- Romênia
- Eslovênia
- Suíça
- Alemanha
- Holanda
- Bélgica
- França



Dentre os países visitados, o sistema mais discutido naquela pesquisa é justamente o sistema Holandês e o Francês. O sistema Romeno não conta com postos de pesagem fixos, realizando o controle de peso e tamanho dos veículos comerciais por meio de unidades móveis operadas por empresas privadas especialmente contratadas para este propósito. Estas empresas já empregam o sistema WIM para pré-seleção dos veículos a serem fiscalizados, de acordo com a pesquisa. O sistema Esloveno é muito semelhante. A adição é que fazem uso de um sistema chamado SiWIM que é um sistema de Weigh in Motion instalado em pontes. A deformação da ponte funciona como uma grande balança que permite a pesagem dos veículos que passam sobre ela.

Tanto a Suíça quanto a França, Holanda e Alemanha já contam com sistemas bastante semelhantes ao que será proposto a instalação. Sistemas de sensores piezoelétricos conjugados com laços indutivos para classificação dos veículos. Ocorre que a maioria dos sistemas implantados ou são WIM de baixa velocidade em áreas de balança ou apresentam baixa precisão de leitura o que remete à exigência de equipes de abordagem para posterior pesagem de veículos em áreas de checagem. De acordo com os pesquisadores daquele estudo há um comum interesse em implantar sistema de alta velocidade com ampliação das margens de confiabilidade para evolução de um sistema totalmente automatizado.

De um modo geral, no que tange aos tipos de sensores utilizados nos equipamentos de pesagem em movimento, observou-se que os mais utilizados para aplicações rodoviárias são o piezo quartzo, o piezo cerâmico e o piezo polímero. Observou-se a existência de um grande desafio, na busca de se melhorar a precisão e os aspectos referentes à manutenção dos sensores.

Os níveis de precisão observados nos equipamentos de pesagem em movimento são suficientes para a aplicação de pré seleção para posterior pesagem em balanças estáticas ou em equipamentos de pesagem em movimento à baixa velocidade. A França já está usando a pesagem a baixa velocidade para efeito de multa.

A França e a Holanda estão realizando pesquisas com o uso de múltiplos sensores, na busca de conseguir precisão suficiente que permita a completa automação no controle de peso e medidas dos veículos comerciais. Na opinião de fiscais e especialistas da França e Holanda, que lideram a pesquisa europeia nesta área, a completa automatização da fiscalização de tamanho e peso dos veículos comerciais, empregando sistemas WIM de alta velocidade, ainda está de 5 a 20 anos distante.

O desafio principal é alcançar níveis suficientes de acurácia e confiabilidade nas pesagens a alta velocidade. Em seguida, será preciso conseguir a certificação metrológica destes sistemas, cuja complexidade exige o desenvolvimento de novos procedimentos de teste. Por último, será preciso modificar a legislação, que, na maioria dos países, ainda exige medições de peso estáticas, ou a baixíssima velocidade.

Os Suíços preocupam-se com os elevados valores de desvio padrão associados às medidas de peso efetuadas com a tecnologia atual dos sistemas WIM de alta velocidade, o que exigiria a adoção de considerável tolerância na fiscalização. Esta alta tolerância nos limites de peso impediria, na opinião dos Suíços, o uso destes sistemas na fiscalização direta automatizada, uma vez que estes não representariam um risco suficientemente alto para induzir a um comportamento legalmente aceito por parte da indústria do transporte.



Nos países europeus, as discussões relativas à aplicação de novas tecnologias ao transporte especial (cargas com peso e/ou tamanho acima do limite legal), concentram-se atualmente nas possibilidades de generalização:

- da oferta de web sites onde o motorista pode, considerando as restrições de via existentes, planejar sua própria rota, como é feito na Suíça;
- do uso de sistemas B-WIM, como o SiWIM, tanto para a verificação da capacidade de carga efetiva das pontes/vias a serem percorridas por um transporte especial, quanto para a monitoração remota destes transportes, como é feito na Eslovênia.

Nos Estados Unidos, durante duas décadas, entre 1984 e 2004, os sistemas de pesagem em movimento (WIM) foram usados, quase que exclusivamente, como coletores de dados de peso, para fundamentar o projeto e a monitoração da performance dos pavimentos. A fiscalização do sobrepeso e sobredimensão eram tipicamente feita através de postos fixos de pesagem estática.

Nos últimos anos, todavia, o uso destes sistemas está sendo expandido para o controle de fronteiras e o suporte à fiscalização de peso, com a disponibilização das chamadas estações virtuais de pesagem, utilizadas para filtrar do fluxo de tráfego os veículos suspeitos de violação do limite legal de carga.

Esta mudança de foco (OLOUFA, 2007, SANTERO et al., 2005), baseou-se na constatação das vantagens do uso da tecnologia WIM, relacionadas a aspectos tais como:

- As estações fixas são facilmente contornadas por infratores;
- Os recursos para fiscalização são muito limitados;
- Aumentar a taxa de conformidade é a verdadeira meta da fiscalização;
- Poucos postos fixos podem monitorar a taxa de conformidade de uma região;
- Infratores habituais podem ser identificados remotamente; veículos conformes não são perturbados;
- Veículos com sobrecarga, frequentemente não aparentam estar sobrecarregados.

Dados de pesagem em movimento acurados são essenciais para o sucesso de projetos considerados importantes pelos Americanos, como o de monitoração da performance de longo prazo de pavimentos (Long Term Pavement Performance – LTPP), e o de desenvolvimento de novos métodos de projeto de pavimentos (GILLMANN, 2005).

A edição 2001 do “Guia de Monitoração de Tráfego”, da FHWA, estimulou a tendência de usar sistemas de classificação de veículos, em vez de contadores de tráfego de uso contínuo, bem como de preferir os sistemas WIM permanentes (de alta velocidade), aos portáteis. Em consequência, observa-se que o uso de sistemas WIM, tanto na área de estudos de pavimentos quanto na de fiscalização, tende a crescer cada vez mais nos Estados Unidos. O uso da tecnologia Bridge-WIM, no entanto, continua bastante raro.

No que tange o cenário brasileiro, um dos principais pilares de um bom sistema de gestão da operação rodoviária, o controle da prática do excesso de carga no transporte comercial rodoviário, vem sendo objeto de renovada atenção, em busca de mais eficiência e eficácia. O uso da pesagem em movimento de baixa velocidade (LS-WIM) nesse controle não é novo no Brasil. Já em 1975 essa tecnologia foi selecionada para aplicação pelo Governo, no âmbito de um Plano Diretor de Pesagem. Assim, em 1978 o primeiro de uma rede de postos de pesagem de veículos (PPVs) começou a operar, usando um sistema WIM do tipo



bendingplate para pré-seleção a 60 km/h, e um sistema WIM do tipo load-cell para a fiscalização a 10 km/h.

À medida que a rede foi sendo implantada, a sobrecarga média observada nas estradas brasileiras caiu de 4,9t em 1981 para 0,69t em 1994. Embora parte do sistema ainda estivesse operando no início dos anos 2000, foi reconhecida a necessidade de sua reavaliação, para modernização.

A experiência brasileira, iniciada em 1978 com WIM de baixa velocidade, hoje alcança um patamar de referência no mundo. Ultimamente o governo anunciou investimentos de R\$ 1,5 bilhão nos próximos 5 anos na expansão dos sistemas de monitoramento de cargas pesadas nas rodovias. Pesquisa da UFSC sobre o uso de múltiplos sensores para WIM de alta velocidade é a principal referência técnica para o projeto governamental.

Segundo informações do 1º Seminário Internacional de Pesagem em Movimento, realizado em Florianópolis em 2011, para que as novas tecnologias possam ser utilizadas para controle de sobrepeso nas estradas brasileiras, órgãos como DNIT, INMETRO, Ministério dos Transportes, fabricantes de equipamentos e operadores de balanças estão trabalhando na avaliação e elaboração de procedimentos para a normalização do uso da WIM no Brasil. O INMETRO afirma que está trabalhando em novas regulamentações destes instrumentos, estabelecendo os requisitos técnicos, metrológicos, para o WIM no Brasil. Depois disso serão estabelecidos os procedimentos de testes a serem executados nos instrumentos em campo.

Segundo especialistas e pesquisadores do assunto, a expansão do uso de sistemas WIM depende da aceitação de todos os envolvidos no transporte de cargas: órgãos dos diversos níveis do governo responsáveis pelo planejamento e execução de infraestruturas ou pela fiscalização; empresários do setor de transportes ou fornecedores das obras licitadas pelo governo; clientes do transporte de carga ou usuários das rodovias em que trafegam os caminhões; universidades e institutos públicos e privados que desenvolvem pesquisas no setor. Os aprimoramentos técnicos demandam ampla série de pesquisas e testes, e a integração do WIM a outros sistemas, como os de medição de ruído, emissões e deterioração do pavimento.

2.4 ESTADO DA PRÁTICA X ESTADO DA ARTE

Todos os mecanismos e sistemas mencionados anteriormente na revisão aqui realizada sobre sistemas de pesagem em movimento constituem o atual estado da Prática.

O estado da arte destes sistemas constitui em aumento da acurácia, principalmente nos sistemas de alta velocidade (HS-WIM) e sua certificação para uso não somente na coleta de dados, mas também na aplicação da lei, na forma de multas diretamente aplicadas aos veículos infratores através de sistemas totalmente automatizados.

Os sistemas de pesagem em movimento (WIM) têm sido objeto nas últimas décadas de cada vez maior utilização e mais pesquisa, especialmente com foco em melhores métodos de calibração (bem desenvolvidas na Europa e extremamente deficientes no Brasil), novos procedimentos para aumento da velocidade de pesagem e novas tecnologias, em especial no que diz respeito aos sensores empregados.



Em contraste com o que acontece no Brasil, na Europa e nos Estados Unidos os Sistemas WIM dão suporte a um conjunto muito mais amplo de atividades ligadas ao controle do excesso de peso. São empregados na pré-seleção de veículos suspeitos de sobrepeso a velocidade normal de operação das rodovias; programação das atividades de fiscalização móvel; e identificação de transportadores/motoristas sistematicamente infratores, alcançando maior eficiência e eficácia na redução do excesso de carga.

Nos Estados Unidos, um grande esforço de produção de Normas e Padrões está sendo feito, decorrente da constatação de que adotar estações de pesagem virtual exige um alto nível de acurácia e confiabilidade dos dados WIM, nível este que só pode ser conseguido com um rigoroso programa de controle de qualidade.

Dados de pesagem em movimento acurados são também essenciais para o sucesso de projetos considerados importantes pelos Americanos, como o de monitoração da performance de longo prazo de pavimentos (Long Term Pavement Performance – LTPP), e o de desenvolvimento de novos métodos de projeto de pavimentos.

Pesagem em Movimento (WIM) é utilizada há anos para coletar dados de peso do tráfego e fazer a pré-seleção de veículos com excesso de carga. No entanto, há um grande interesse em se estabelecer a especificação de sistemas de pesagem (WIM) a ser usada para a fiscalização da lei em casos de operação em alta velocidade.

As balanças tradicionais de peso estático e os sistemas de pesagem em movimento (WIM) a baixa velocidade já são usados diretamente para a fiscalização da lei em alguns países. Contudo, apesar de auxiliarem na redução da probabilidade de sobrecarga, tais sistemas não são capazes de eliminá-la com eficiência.

Ainda que o WIM de alta velocidade tenha maior eficiência, sabe-se que estes sistemas ainda não tem elevada precisão, impossibilitando seu uso para aplicação da lei. O nível de precisão das medidas ainda é um desafio, ainda está abaixo dos patamares de excelência, sendo um tema amplamente analisado e discutido para a definição de normas que regulamentam o setor de cargas e seu uso na fiscalização dos veículos.



3 ESPECTRO DE CARGAS - CONSIDERAÇÕES IMPORTANTES

Espectro de carga pode ser definido como sendo o percentual de cada veículo comercial (com suas configurações e magnitudes de carga específicas) que ira solicitar o pavimento durante o período de projeto. A partir do uso do espectro de carga, pode-se avaliar como veículos reais danificam a estrutura do pavimento em sua vida útil.

O tráfego de veículos representa um papel muito importante no dimensionamento de estruturas de pavimentos, bem como a representação do seu comportamento ao longo do tempo. No decorrer das últimas décadas muitos estudos têm sido desenvolvidos com o interesse de representar de forma mais próxima à realidade as condições impostas pelo carregamento oriundo dos veículos e os seus reflexos nos pavimentos, para que os projetos e sua posterior análise possam ser desenvolvidos da maneira mais fiel possível a situação vivida em campo.

Segundo Fontenele (2011) tais estudos se apoiaram na busca de estruturas eficientes que tenham um comportamento adequado e previsível mediante as inúmeras solicitações do trafego esperado para o período de projeto. Tendo em vista que são bases fundamentais para um bom sistema de gerência a fim de auxiliar no emprego dos recursos disponíveis, não só a partir da escolha das corretas intervenções, mas também dos momentos propícios para tais.

As pesquisas realizadas com tal intuito sempre reforçam que a utilização das abordagens empíricas datadas dos anos 60 na consideração dos efeitos do tráfego nas estruturas de pavimentos vem acompanhada de limitações, onde seus resultados são reproduzíveis somente para as mesmas, ou muito similares características da região do seu desenvolvimento.

Neste capítulo serão apresentadas informações importantes sobre a classificação dos diferentes tipos de veículos que compõe o espectro de cargas atuante em uma determinada rodovia e seus limites legais de cargas admissíveis pela atual legislação, além de considerações sobre a importância do espectro de cargas na análise de desempenho e dimensionamento de pavimentos.

3.1 IMPORTÂNCIA DA CARACTERIZAÇÃO DO TRÁFEGO

O tráfego de veículos representa um papel muito importante no dimensionamento de estruturas de pavimentos, bem como na representação do seu desempenho ao longo de sua vida de projeto sendo o principal carregamento a ser considerado, seja em métodos empíricos ou mecanísticos, em projetos de pavimentos rígidos ou flexíveis.

As características do tráfego afetam diretamente a qualidade e a durabilidade dos pavimentos flexíveis. Solicitações acima das previstas em projeto podem ocasionar degradações prematuras como deformações permanentes, trincas e perda de material da superfície de rolamento.



Para um adequado dimensionamento é necessário identificar corretamente as cargas que solicitarão o pavimento durante o período de projeto, ou seja, modelar o carregamento ao longo da vida útil do pavimento. Sabe-se que este carregamento real é de grande complexidade: tráfego bastante heterogêneo, apresentando variações relativas aos tipos de veículos e cargas transportadas - cargas aleatórias, várias configurações de eixo e de rodas, velocidades variáveis, posição de solicitação variável, entre outros.

Todas estas variações das condições do tráfego refletem-se em dificuldades no dimensionamento dos pavimentos. As principais dificuldades encontram-se na previsão da evolução do tráfego ao longo do tempo e na avaliação do poder de destruição, de modo comparativo, que exercem as várias cargas a distintos níveis de repetição.

Avançando no intuito de minimizar estas dificuldades, têm surgido no decorrer das últimas décadas, muitos estudos desenvolvidos com o interesse de representar de forma mais próxima à realidade as condições impostas pelo carregamento oriundo dos veículos de carga e os seus reflexos nos pavimentos, para que os projetos e sua posterior análise possam ser desenvolvidos da maneira mais fiel possível à situação vivida em campo.

Segundo Fontenele (2011) tais estudos se apoiaram na busca de estruturas eficientes que tenham um comportamento adequado e previsível mediante as inúmeras solicitações do tráfego esperado para o período de projeto. Neste contexto surge a importância do conhecimento do espectro de cargas rodantes nas rodovias. O espectro de cargas pode ser definido como sendo a porcentagem de cada veículo comercial (com suas configurações e magnitudes de carga específicas) que solicitam o pavimento.

A partir do uso do espectro de cargas pode-se avaliar de que forma os carregamentos reais, sem o uso de simplificações na consideração da magnitude das cargas e da configuração dos veículos, danificam a estrutura do pavimento durante a sua vida útil.

Outro fator importante a ser considerado diz respeito a conformidade com a legislação em relação às cargas reais transportadas (controle de sobrepeso). A não conformidade acarreta em consequências negativas bastante relevantes no que tange a vida útil dos pavimentos (degradação prematura), ao número e severidade dos acidentes envolvendo veículos comerciais de transporte, e à lealdade da concorrência entre operadores.

A seguir serão abordados alguns pontos relevantes sobre a consideração do tráfego no dimensionamento e gerência dos pavimentos rodoviários, além da importante contribuição da implantação de um sistema WIM na caracterização do espectro de cargas reais rodantes nas rodovias brasileiras.

3.2 LIMITES DE CARGAS LEGAIS ADMISSÍVEIS (LEIS DE BALANÇA)

Os veículos comerciais devem obedecer a certos limites e as cargas por eixo não podem ser superiores a determinados valores, segundo a legislação em vigor. Quem regulamenta estes limites para as cargas máximas legais é a chamada lei da balança.

No Brasil, o Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN), a partir das Resoluções nº211/06 e 210/06 e Portaria do Departamento Nacional de Trânsito (DENATRAN) nº 86/06, regulamentou os artigos 99 e 100 do Código Nacional de Trânsito Brasileiro (CTB) que



estipulam os limites de dimensões, peso bruto total (PBT) e por eixo a serem observados por todos os veículos rodoviários de carga que circulam nas rodovias brasileiras.

O PBT nada mais é, segundo DNIT (2006c), que o peso máximo que o veículo pode transmitir ao pavimento, constituído da soma do peso próprio do veículo (tara) mais a carga útil máxima incluindo o condutor e os passageiros que ele pode transportar (lotação).

Sobre os valores de PBT/PBTC foi determinada pela lei 7.408/85 (BRASIL, 1985) que deve ser atribuída uma tolerância de 5% ao limite máximo permitido. Os pesos por eixo receberam na Resolução nº 104 de 21/12/99 do CONTRAN a alteração da tolerância ao excesso de peso de 5% para 7,5%.

Peterlini (2007) salienta a evidência de que os transportadores carregam seus veículos considerando a tolerância de 7,5% permitida pela Resolução do CONTRAN como ganho real de sobrecarga e não como tolerância do próprio equipamento de pesagem, sem contar com a isenção de multas dos excessos nos eixos dada pela Resolução nº 104 de 21/11/1999, que considerou apenas o PBT com tolerância de 5%.

O autor reforça que tais fatos fizeram com que ficasse evidente a necessidade da imediata revogação de tais Resoluções do CONTRAN, por nunca terem levado em conta o caráter maléfico à preservação dos pavimentos que as permissividades legais desses procedimentos possuíam.

Na Resolução do CONTRAN nº 258 de 30/11/2007 a tolerância para os excessos de peso nos eixos foi alterada para 5%, revogando as Resoluções nº 102/99, 104/99 e 114/00 que tratavam sobre a tolerância máxima no PBT e peso bruto por eixo. A redução da tolerância de 7,5% para 5% nos eixos foi adiada (pela quinta vez) até dezembro de 2011, a partir da Resolução nº 365/10 do CONTRAN.

Conforme estabelece ainda a Resolução nº. 258/07 do CONTRAN, até 31 de dezembro de 2008, era admitida uma tolerância máxima de 7,5 % (sete e meio por cento) sobre os limites de peso bruto transmitido por eixos às superfícies das vias públicas.

Após essa data, a tolerância máxima para o peso bruto transmitido por eixos voltará a ser de 5% (cinco por cento). Os “Pesos Máximos por Eixo” conforme definição da Resolução nº 210/06 do CONTRAN são apresentados na Tabela 4 e na Figura 3.



Tabela 4 – Cargas máximas legais segundo regulamentação CONTRAN

EIXO ou CONJUNTO DE EIXOS	RODAGEM	SUSPENSÃO	ENTRE-EIXOS (m)	CARGA (kg)	TOLERÂNCIA (7,5%)
Isolado	simples	direcional	-	⁽¹⁾ 6.000	6.450
Isolado	simples	direcional	-	⁽²⁾ 6.000	6.450
Isolado	dupla	-	-	10.000	10.750
Duplo	simples	direcional	-	12.000	12.900
Duplo	dupla	tandem	>1,20 ou ≤ 2,40	17.000	18.280
Duplo	dupla	não em tandem	>1,20 ou ≤ 2,40	15.000	16.130
Duplo	simples+dupla	especial	< 1,20	9.000	9.680
Duplo	simples+dupla	especial	>1,20 ou ≤ 2,40	13.500	14.520
Duplo	Extralarga ⁽⁴⁾	pneumática	>1,20 ou ≤ 2,40	17.000	18.280
Triplo ⁽³⁾	dupla	tandem	>1,20 ou ≤ 2,40	25.500	27.420
Triplo ⁽³⁾	Extralarga ⁽⁴⁾	pneumática	>1,20 ou ≤ 2,40	25.500	27.420

⁽¹⁾ Para rodas com diâmetro inferior ou igual a 830 mm.

⁽²⁾ observada a capacidade e os limites de peso indicados pelo fabricante dos pneumáticos e diâmetro superior a 830 mm.

⁽³⁾ aplicável somente a semi-reboques.

⁽⁴⁾ pneu single (385/65 R 22,5) aplicável somente a semi-reboques e reboques conforme a Resolução nº 62 de 22/05/98 do CONTRAN. A utilização de outros tipos de pneumáticos "single" estará sujeita à Autorização Provisória Experimental - APEX (art. 2º da Resolução Nº 62).

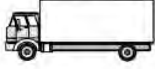

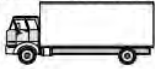

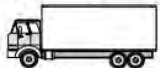
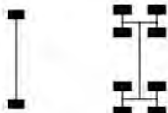


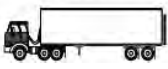


Tipo de eixo	Limite legal (por eixo)	Configuração
Simples – rodas simples Ex.: caminhões leves 	6,0 t	
Simples – rodas duplas Ex.: caminhões médios 	10,0 t	
Tandem duplo Ex.: caminhões pesados 	17,0 t	
Tandem triplo Ex.: semi-reboque 	25,5 t	
Usual: Tandem duplo modificado com eixo retrátil à frente ou atrás. Outras combinações Ex.: reboques e semi-reboques   		

Figura 3 - Cargas admissíveis por veículo - Limite legal por eixo



3.3 CLASSIFICAÇÃO DA FROTA CIRCULANTE

O tráfego rodoviário é formado por veículos de diferentes configurações e magnitude de cargas e o conhecimento adequado das suas características são muito importantes para o estudo do comportamento de pavimentos, tanto rígidos como flexíveis, e os danos causados a essa estrutura.

As modificações nas características dos veículos se refletem em modificações nos efeitos gerados sobre os pavimentos contribuindo para a interpretação das causas da deterioração dos pavimentos, delineando as tendências gerais das propagações de defeitos tipicamente causados pela ação do tráfego. Dessa forma, torna-se necessário classificar o mais detalhadamente possível a frota circulante, principalmente no que se refere aos veículos comerciais.

Um exemplo de classificação simplificada dos veículos rodoviários é apresentado a seguir. No entanto, é preferível que a classificação seja mais detalhada, pois podem ocorrer expressivas variações na capacidade de carga entre caminhões de uma determinada subclasse, em função do tipo de veículo.

- **Veículos de passeio ou veículos leves:** automóveis e utilitários;
- **Veículos comerciais:**
 - *Caminhões leves:* 2 eixos simples, ambos com rodas simples;
 - *Caminhões médios:* 2 eixos simples, rodas traseiras duplas;
 - *Caminhões pesados:* 2 eixos, traseiro em tandem;
 - *Reboques e semi-reboques:* outras combinações;
 - *Ônibus:* equivalente a caminhões leves.

O sistema de classificação adotado pelo DNIT apresenta uma classificação mais detalhada, atribui a cada classe de veículo de carga um código alfanumérico onde o primeiro algarismo significa o número de eixos do veículo simples ou unidade tratora, enquanto que o segundo, caso exista, representa a quantidade de eixos da(s) unidade(s) rebocada(s). De acordo com DNIT (2006) as letras significam:

- C:** Veículo simples (caminhão ou ônibus) ou veículo trator + reboque;
- S:** Veículo trator (cavalo mecânico) + semirreboque;
- I:** Veículo trator + semirreboque com distância entre eixos maior que 2,40 m;
- J:** Veículo trator + semirreboque com um eixo isolado e outro em tandem;
- D:** Combinação dotada de 2 (duas) articulações;
- T:** Combinação dotada de 3 (três) articulações;
- Q:** Combinação dotada de 4 (quatro) articulações;
- X:** Veículos especiais (usados para transportar cargas excepcionais em peso ou dimensões, possuem mais de 9 eixos, necessitando, portanto, de uma Autorização Especial de Tráfego - AET);
- B:** Ônibus.



3.3.1 Classificação por eixo

Em virtude da diversidade de configuração de eixos dos veículos rodoviários, faz-se necessária a sua detalhada abordagem. Os tipos de eixos de veículos rodoviários de carga podem ser de dois tipos: o isolado, chamado de eixo simples; e os em conjunto, denominados de eixos em tandem. Tais eixos podem ser dotados de apenas uma roda na extremidade (rodas simples) ou duas rodas (rodas duplas).

As cargas dos veículos são transmitidas ao pavimento através das rodas dos pneumáticos. Para efeito de dimensionamento de pavimentos o tráfego de veículos comerciais (caminhões, ônibus) é de fundamental importância. As rodas dos pneumáticos (simples ou duplas) são acopladas aos eixos, que podem ser classificadas da seguinte forma:

- **Eixos Simples:**

Um conjunto de duas ou mais rodas, cujos centros estão em um plano transversal vertical ou podem ser incluídos entre dois planos transversais verticais, distantes de 100 cm, que se estendam por toda a largura do veículo. Pode-se ainda definir:

- a) ***Eixo simples de rodas simples (ESRS):*** com duas rodas, uma em cada extremidade (2 pneus); e
- b) ***Eixos simples de rodas duplas (ESRD):*** com quatro rodas, sendo duas em cada extremidade (4 pneus).

- **Eixos Tandem:**

Quando dois ou mais eixos consecutivos, cujos centros estão distantes de 100 cm a 240 cm e ligados a um dispositivo de suspensão que distribui a carga igualmente entre os eixos constitui-se um eixo tandem. Os eixos tandem podem ser divididos em:

- a) ***Eixo tandem duplo (ETD):*** com dois eixos, com duas rodas em cada extremidade de cada eixo (8 pneus). Nos fabricantes nacionais o espaçamento médio de 1,36m;
- b) ***Eixo tandem triplo (ETT):*** com três eixos, com duas rodas em cada extremidade de cada eixo (12 pneus).

É importante notar que existem combinações de eixos simples de rodas simples com eixos simples de rodas duplas em ônibus, o que não configura um eixo tipo tandem duplo. Além disso, o DNIT chama a atenção para os conjuntos de 2 ou 3 eixos onde as distâncias entre eixos forem maiores que 2,40 m, pois nesse caso estes serão considerados isolados.

Na Figura 4 são apresentados os tipos de eixos dos veículos rodoviários comerciais que circulam nas rodovias brasileiras (ESRS, ESRD, ETD, ETT). Além disso, são apresentadas as cargas admissíveis (carga máxima autorizada) em cada tipo de eixo e algumas informações adicionais importantes.

Na sequência são apresentadas as configurações dos veículos comerciais rodoviários, segundo Manual de Estudos de Tráfego do DNIT (2006) com Silhueta, caracterização (nomenclatura, número de eixos, distanciamento entre eixos, carga por eixo) PBT/CMT MÁX. e classificação.



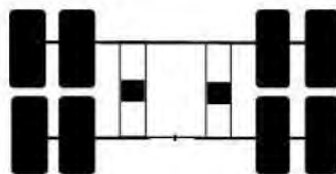
Eixo simples de rodas simples (ESRS)



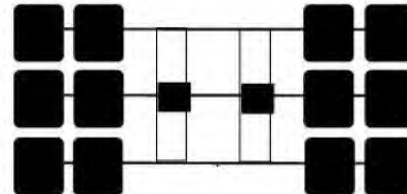
Eixo simples de rodas duplas (ESRD)



Eixo tandem duplo (ETD)



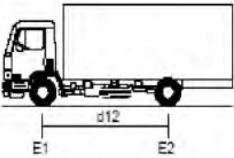
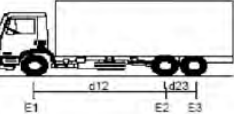
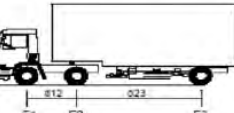
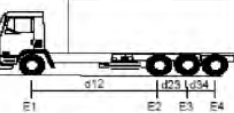
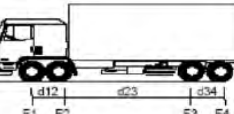
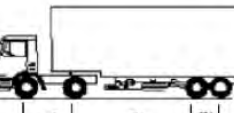
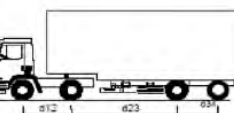
Eixo tandem triplo (ETT)

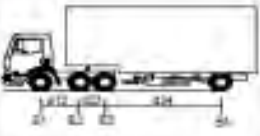
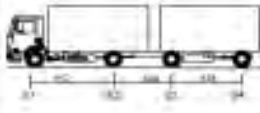
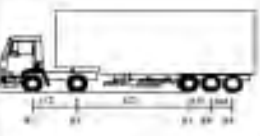
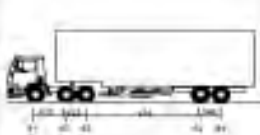


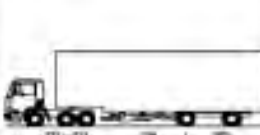


Configuração	Distância entre eixos (ee)	Qtde. de Eixos	Qtde. de Pneus	Suspensão	Carga máxima autorizada
	-----	1	2	-----	6
	-----	1	4	-----	10
	-----	2	4	-----	12
	Menor que 1,20m	2	6	Especial	9
	De 1,20 a 2,40m	2	6	Especial	13,5
	Maior que 1,20 e menor que 2,40 m	2	8	Tandem	17
				Não Tandem	15
	Maior que 1,20 e menor que 2,40 m	3	12	Tandem	25,5
	Maior que 2,40 m	2	8	-----	20
	Maior que 2,40 m	3	12	-----	30

Figura 4 – Tipos de eixos de veículos rodoviários de carga brasileiros

Fonte: DNIT (2006)

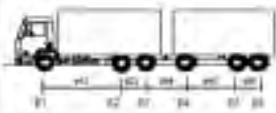
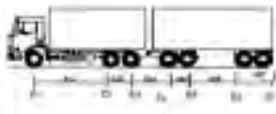
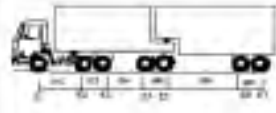
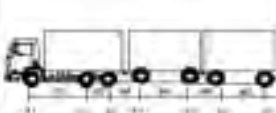
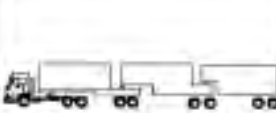

SILHUETA	Nº DE EIXOS	PBT/CMT MÁX.(t)	CARACTERIZAÇÃO	CLASSE
	2	16(16,8)	CAMINHÃO E1 = eixo simples (ES), rodagem simples (RS), carga máxima (CM) = 6t ou capacidade declarada pelo fabricante do pneumático E2 = ES, rodagem dupla (RD), CM = 10t $d12 \leq 3,50m$	2C
	3	23(24,2)	CAMINHÃO TRUCADO E1 = ES, RS, CM = 6t E2E3 = ES, conjunto de eixos em tandem duplo TD, CM = 17t $d12 > 2,40m$ $1,20m < d23 \leq 2,40m$	3C
	3	26(27,3)	CAMINHÃO TRATOR + SEMI REBOQUE E1 = ES, RS, CM = 6t E2 = ED, RD, CM = 10t E3 = ED, RD, CM = 10t $d12, d23 > 2,40m$	2S1
	4	31,5(33,1)	CAMINHÃO SIMPLES E1 = ES, RS, CM 6t E2E3E4 = conjunto de eixos em tandem triplo TT; CM = 25,5t $d12 > 2,40$ $1,20m < d23, d34 \leq 2,40m$	4C
	4	29(30,5)	CAMINHÃO DUPLO DIRECIONAL TRUCADO E1E2 = conjunto de eixos direcionais CED, CM = 12t E3E4 = TD, CM = 17t $1,20m < d34 \leq 2,40m$	4CD
	4	33(34,7)	CAMINHÃO TRATOR + SEMI REBOQUE E1 = ES, RS, CM 6t E2 = ED, RD, CM 10t E3E4 = TD, CM = 17t $d12, d23 > 2,40m$ $1,20m < d34 \leq 2,40m$	2S2
	4	36(37,8)	CAMINHÃO TRATOR + SEMI REBOQUE E1 = ES, RS, CM 6t E2 = ED, RD, CM 10t E3 = ED, RD, CM 10t E4 = ED, RD, CM 10t $d12, d23, d34 > 2,40m$	2I2

SILHUETA	Nº DE EIXOS	PBT/CMT MÁX.(t)	CARACTERIZAÇÃO	CLASSE
	4	33(34,7)	CAMINHÃO TRATOR TRUCADO + SEMI REBOQUE E1 = ES, RS, CM 6t E2E3 = TD, CM 17t E4 = ED, RD, CM 10t d12, d34 > 2,40m 1,20 < d23 ≤ 2,40	3S1
	4	36(37,8)	CAMINHÃO + REBOQUE E1 = ES, RS, CM 6t E2 = ED, RD, CM 10t E3 = ED, RD, CM 10t E4 = ED, RD, CM 10m d12, d23, d34 > 2,40m	2C2
	5	41,5(43,6)	CAMINHÃO TRATOR + SEMI REBOQUE E1 = ES, RS, CM 6t E2 = ED, RD CM 10t E3E4E5 = TT, CM 25,5t d12, d23 > 2,40m 1,20m d34, d45 ≤ 2,40m	2S3
	5	40(42)	CAMINHÃO TRATOR TRUCADO + SEMI REBOQUE E1 = ES, RS, CM 6t E2E3 = TD, CM 17t E4E5 = TD, CM 17t d12, d34 > 2,40m 1,20m < d23, d45 ≤ 2,40m	3S2
	5	45(47,3)	CAMINHÃO TRATOR + SEMI REBOQUE E1 = ES, RS, CM 6t E2 = ED, RD, CM 10t E3 = ED, RD, CM 10t E4 = ED, RD, CM 10t E5 = ED, RD, CM 10t d12, d23, d34, d45 > 2,40m	2I3
	5	43(45,2)	CAMINHÃO TRATOR + SEMI REBOQUE E1 = ES, RS, CM 6t E2 = ED, RD, CM 10t E3 = ED, RD, CM 10t E4E5 = TD, CM 17t d12, d23, d34 > 2,40m 1,20m < d45 ≤ 2,40m	2J3
	5	43(45,2)	CAMINHÃO TRATOR TRUCADO + SEMI REBOQUE E1 = ES, RS, CM 6t E2E3 = TD, CM 17t E4 = ED, RD, CM 10t E5 = ED, RD, CM 10t d12, d34, d45 > 2,40m 1,20m < d23 ≤ 2,40m	3I2



SILHUETA	Nº DE EIXOS	PBT/CMT MÁX. (t)	CARACTERIZAÇÃO	CLASSE
	5	43(45,2)	CAMINHÃO + REBOQUE E1 = ES, RS, CM 6t E2 = ED, RD, CM 10t E3 = ED, RD, CM 10t E4E5 = TD, CM 17t d12, d23, d34 > 2,40m 1,20m < d45 ≤ 2,40m	2C3
	5	43(45,2)	CAMINHÃO TRUCADO + REBOQUE E1 = ES, RS, CM 6t E2E3 = TD, CM 17t E4 = ED, RD, CM 10t E5 = ED, RD, CM 10t d12, d34, d45 > 2,40m 1,20m < d23 ≤ 2,40m	3C2
	6	45(47,3)	CAMINHÃO TRATOR TRUCADO + SEMI REBOQUE E1 = ES, RS, CM 6t E2E3 = TD, CM 17t E4E5E6 = TT, CM 25,5t d12, d34 > 2,40m 1,20m < d23, d45, d56 ≤ 2,40m	3S3
	6	45(47,3)	CAMINHÃO TRATOR TRUCADO + SEMI REBOQUE E1 = ES, RS, CM 6t E2E3 = TD, CM 17t E4 = ED, RD, CM 10t E5 = ED, RD, CM 10t E6 = ED, RD, CM 10t d12, d34, d45, d56 > 2,40m 1,20m < d23 ≤ 2,40m	3I3
	6	45(47,3)	CAMINHÃO TRATOR TRUCADO + SEMI REBOQUE E1 = ES, RS, CM 6t E2E3 = TD, CM 17t E4 = ED, RD, CM 10t E5E6 = TD, CM 17t d12, d34, d45 > 2,40m 1,20m < d23, d56 ≤ 2,40m	3I3
	6	45(47,3)	CAMINHÃO TRUCADO + REBOQUE E1 = ES, RS, CM 6t E2E3 = TD, CM 17t E4 = ED, RD, CM 10t E5E6 = TD, CM 17t d12, d34, d45 > 2,40m 1,20m < d23, d56 ≤ 2,40m	3C3
	6	19,5(20,5)	CAMINHÃO TRATOR E1 = ES, RS, CM 6t E2E3 = TD(6 pneus), CM 13,5t 1,20m < d23 ≤ 2,40m A CMT do conjunto vai variar conforme a capacidade do semi-reboque, no mínimo 10 ton até, no máximo o limite legal de 4t ton.	X



SILHUETA	Nº DE EIXOS	PBT/CMT MÁX.(t)	CARACTERIZAÇÃO	CLASSE
	6	50(52,5)	RÔMEU E JULIETA(caminhão trucado + reboque) E1 = ES, RS, CM 6t E2E3 = T0, CM 17t E4 = ED, RD, CM 10t E5E6 = TD, CM 17t d12, d34, d45 > 2,40m 1,20m < d23, d56 ≤ 2,40m	3D3
	7	57(59,9)	RÔMEU E JULIETA(caminhão trucado + reboque) E1 = ES, RS, CM 6t E2E3 = T0, CM 17t E4E5 = TD, CM 17t E6E7 = TD, CM 17t d12, d34, d56 > 2,40m 1,20m < d23, d45, d67 ≤ 2,40m	3D4
	7	57(59,9)	BI TREM ARTICULADO(caminhão trator trucado + dois semi reboques) E1 = ES, RS, CM 6t E2E3 = T0, CM 17t E4E5 = TD, CM 17t E6E7 = TD, CM 17t d12, d34, d56 > 2,40m 1,20m < d23, d45, d67 ≤ 2,40m	3D4
	7	63(66,2)	TREMINHAO(caminhão trucado + dois reboques) E1 = ES, RS, CM 6t E2E3 = TD, CM 17t E4 = ED, RD, CM 10t E5 = ED, RD, CM 10t E6 = ED, RD, CM 10t E7 = ED, RD, CM 10t d12, d34, d56, d67 > 2,40m 1,20m < d23 ≤ 2,40m	3Q4
	9	74(77,7)	TRI TREM(caminhão trator trucado + três semi reboques) E1 = ES, RS, CM 6t E2E3 = TD, CM 17t E4E5 = TD, CM 17t E6E7 = TD, CM 17t E8E9 = TD, CM 17t d12, d34, d56, d78 > 2,40m 1,20m < d23, d45, d67, d89 ≤ 2,40m	3T6
	9	74(77,7)	RODOTREM (caminhão trator trucado + dois semi reboques dom dolly) E1 = ES, RS, CM 6t E2E3 = TD, CM 17t E4E5 = TD, CM 17t E6E7 = TD, CM 17t E8E9 = TD, CM 17t d12, d34, d56, d78 > 2,40m 1,20m < d23, d45, d67, d89 ≤ 2,40m	3T6



SILHUETA	Nº DE EIXOS	PBT/CMT MÁX.(t)	CARACTERIZAÇÃO	CLASSE
	2	16(16,8)	ÔNIBUS E1 = ES, RS, CM 6t ou a capacidade declarada pelo fabricante do pneumático E2 = ED, RD, CM 10t $d_{12} \leq 3,50\text{m}$	2CB
	3	19,5(20,5)	ÔNIBUS TRUCADO E1 = ES, RS, CM 6t E2E3 = conjunto de eixos em tandem duplo com 6 pneumáticos, carga máxima 13,5t $d_{12} > 2,40\text{m}$ $1,20 < d_{23} \leq 2,40\text{m}$	3CB
	4	25,5(26,8)	ÔNIBUS DUPLO DIRECIONAL TRUCADO E1E2 = conjunto de eixos direcionais, carga máxima 12 ton E3E4 = conjunto de eixos em tandem duplo com 6 pneumáticos, carga máxima 13,5t $1,20 < d_{34} \leq 2,40\text{m}$	4CB
	3	26(27,3)	ÔNIBUS URBANO ARTICULADO E1 = ES, RS, CM 6t E2 = ED, RD, CM 10t E3 = ED, RD, CM 10t $d_{12}, d_{23} > 2,40\text{m}$	2SB1
	4	36(37,8)	ÔNIBUS URBANO BI-ARTICULADO E1 = ES, RS, CM 6t E2 = ED, RD, CM 10t E3 = ED, RD, CM 10t E4 = ED, RD, CM 10t $d_{12}, d_{23}, d_{34} > 2,40\text{m}$	2IB2

Figura 5 – Veículos adotados na classificação DNIT: Composições segundo Manual de Estudo de Tráfego do DNIT - Publicação IPR-723 (2006)

3.4 CONSIDERAÇÕES DO ESPECTRO DE CARGAS NO DIMENSIONAMENTO

De acordo com o Manual de Pavimentação do DNIT, pavimento flexível é aquele em que todas as camadas sofrem deformação elástica significativa sob o carregamento aplicado e, portanto, a carga se distribui em parcelas aproximadamente equivalentes entre as camadas. Para um adequado dimensionamento dessa estrutura, é necessário identificar corretamente as cargas de eixo que solicitarão o pavimento durante o seu período de projeto e aplicar essas condições de carregamento através de um método, empírico ou mecânico.

Métodos empíricos, como o do DNIT e o antigo método da AASHTO (última versão empírica de 1993) ainda são amplamente utilizados no projeto de pavimentos flexíveis. Nesses métodos, todas as configurações e magnitudes de cargas de eixo que, estimadas em um estudo de tráfego, atuarão sobre o pavimento ao longo de sua vida útil, são transformadas em um número equivalente de solicitações de carga padrão (número N), conforme visto anteriormente.



A simplicidade de se trabalhar com apenas um número como solicitação de tráfego é atrativa, porém torna o dimensionamento limitado, pois a equivalência de cargas não está ligada apenas a carga de eixo. Pressão de inflação, tipo de pneus e espaçamento entre eixos, variáveis de importante atuação no pavimento, não são consideradas.

Atualmente, como resultado do avanço relacionado às pesquisas destinadas a representação do comportamento das estruturas mediante as solicitações do tráfego, observa-se a tendência na substituição da tradicional base puramente empírica pela empírico-mecanística. Neste quesito um dos métodos mais recentes foi proposto pela *National Cooperative Highway Research Program* (NCHRP) no projeto 1-37 A, o Método AASHTO 2002, que inseriu um novo conceito para caracterização do tráfego: os espectros de carga por eixo (*Axle Load Spectra*).

Ao empregarem-se métodos mecânicos, (nos quais se calculam tensões, deformações e deslocamentos no pavimento e os comparam a valores admissíveis) é possível considerar o espectro de carga (porcentagem de cada tipo de veículo comercial com suas configurações e cargas de eixo) e fatores de crescimento de tráfego (crescimento do volume de tráfego) e determinar o dano que veículos reais causarão ao pavimento, utilizando-se qualquer configuração de carga sem a necessidade de transformá-la com algum fator de equivalência (como quando se trabalha com o número N) (Garcia, 2010).

O uso de métodos que empregam o empirismo na caracterização do tráfego, elaborados para condições totalmente diferentes das encontradas atualmente, principalmente no Brasil, podem gerar resultados divergentes aos da real situação em campo.

Assim, tendo em vista que os modelos de desempenho são importantes ferramentas dos sistemas de gerência de pavimentos para prever a evolução da condição ao longo do tempo e/ou tráfego acumulado e, portanto, dependentes de uma adequada quantificação das cargas do tráfego, demonstra-se a importância desta pesquisa que consiste em classificar e estudar o espectro de carga que atualmente circula na rodovia BR-290/RS, trecho da Freeway, analisando as cargas de eixos dos veículos comerciais através da implantação de um sistema de pesagem em movimento..

3.4.1 Definição do tráfego

Métodos empíricos, como o do DNIT e o antigo método da AASHTO (última versão empírica de 1993) ainda são amplamente utilizados no projeto de pavimentos flexíveis. Nesses métodos não é considerado o espectro de carga, faz-se o uso apenas de um número equivalente de solicitações, ou seja, é utilizado o conceito de Eixo Padrão Rodoviário (Figura 6), onde todas as configurações e magnitudes de cargas de eixo que, estimadas em um estudo de tráfego, atuarão sobre o pavimento ao longo de sua vida útil, são carga por eixo em toneladas (t) transformadas em um Número Equivalente de Solicitações de Carga Padrão (número N).

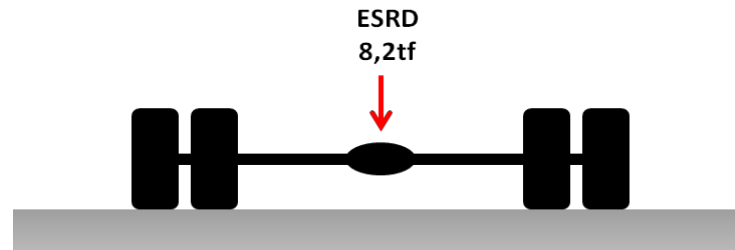


Figura 6 – Eixo Padrão Rodoviário (ESRD 8,2tf)

A utilização do conceito de Eixo Padrão surgiu em virtude da heterogeneidade do tráfego, com diversas configurações de eixos e magnitude de cargas transportadas por cada tipo de veículo comercial. Neste contexto, como forma de simplificação é adotado um padrão que serve de referência para os demais carregamentos onde o tráfego dos diferentes tipos de veículos pode ser expresso em termos de número equivalente de solicitações do Eixo Padrão. Este eixo é um eixo simples de rodas duplas com as seguintes características:

- Carga por Eixo (P): 18.000 lb = 8.165 Kgf = 8,2 tf = 80 KN
- Carga por roda (P/4): 4.500 lb = 2.041 Kgf = 2,04 tf = 20 KN
- Pressão de Enchimento dos Pneus (p): 80 lb/Pol2 = 5,6 Kgf/cm²
- Pressão de Contato Pneu-Pavimento (q): 5,6 Kgf/cm²
- Raio da Área de Contato Pneu-Pavimento (r): 10,8 cm
- Afastamento entre Pneus por Roda (s): 32,4 cm

O número N representa o número de repetições de carga equivalente a um eixo de 8,2t tomado como padrão (Eixo Padrão Rodoviário). Este é o parâmetro de maior importância na maioria dos métodos e processos de dimensionamento de pavimentos ainda utilizados atualmente.

Estes métodos foram desenvolvidos em condições onde, em termos de tráfego, as características dos veículos (tipo de eixo, tipo de rodagem, pressão de enchimento dos pneus e tipo de suspensão) e das cargas eram bem diferentes das atualmente existentes.

Sabemos que a utilização das abordagens empíricas datadas dos anos 60 na consideração dos efeitos do tráfego nas estruturas de pavimentos vem acompanhada de limitações, onde seus resultados são reproduzíveis somente para as mesmas, ou muito similares características da região do seu desenvolvimento.

Porém, atualmente os projetos de pavimentos e sua vida remanescente continuam sendo verificadas sob as mesmas bases empíricas e expressas em termos do número equivalente de solicitações do eixo padrão de 8,2t (número N) para converter o tráfego misto em cargas equivalentes por eixo. A seguir é descrito de forma simplificada a metodologia empregada.



3.4.1.1 Definição dos fatores de equivalência de operações (FE)

Além da classificação dos veículos, conforme mencionado anteriormente e mostrada nas tabelas apresentadas no Manual de Estudo de Tráfego do DNIT, também é importante classificar os tipos de eixos, estabelecendo os limites de carga para cada tipo de eixo e verificando a distribuição da carga por eixo, para cada veículo comercial.

Devido às variações das condições do tráfego, efeitos cumulativos das solicitações de tráfego são expressos em termos de fatores de equivalência. Ou seja, os diferentes tipos de eixos são comparados em termos de danos causados aos pavimentos.

A conversão do tráfego misto em um equivalente de operações de um eixo considerado padrão é efetuada aplicando-se os chamados fatores de equivalência de cargas. Estes fatores permitem converter uma aplicação de um eixo solicitado por uma determinada carga em um número de aplicações do eixo-padrão que deverá produzir um efeito equivalente.

Os trechos experimentais da AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*) e do USACE (Corpo de Engenheiros do Exército Norteamericano) fornecem subsídios para o desenvolvimento de fatores de equivalência de carga para converter cargas variadas de tráfego em cargas equivalentes padronizadas.

Os fatores de equivalência da AASHTO baseiam-se na perda de serventia e são diferentes dos obtidos pelo USACE, que avaliaram os efeitos do carregamento na deformação permanente (afundamento nas trilhas de roda). As expressões para cálculo dos fatores de equivalência de operações são apresentadas nas Tabelas 5 e 6, de acordo com os estudos realizados pelo USACE e pela AASHTO, respectivamente.

As curvas de correlação entre cargas por eixo e fatores de equivalência de operações utilizadas pelo método de dimensionamento de pavimentos flexíveis do antigo DNER (Figura 7) baseiam nas expressões obtidas pelo USACE.

Estes fatores de equivalência utilizados pelo método do DNER permitem a conversão de aplicações de diferentes solicitações (ESRS, ESRD, ETD e ETD) em um número equivalente de aplicações do eixo padrão (8,2 tf).

Tabela 5 – Expressões para obtenção de equivalência de operações (USACE)

Tipos de Eixos	Faixas de Cargas (tf)	Equações (P em tf)
Eixo simples	0 – 8	$FEO = 2,0782 \times 10^{-4} \times P^{4,0175}$
	≥ 8	$FEO = 1,8320 \times 10^{-6} \times P^{6,2542}$
Eixo tandem duplo	0 – 11	$FEO = 1,5920 \times 10^{-4} \times P^{3,4720}$
	≥ 11	$FEO = 1,5280 \times 10^{-6} \times P^{5,4840}$
Eixo tandem triplo	0 – 18	$FEO = 8,0359 \times 10^{-5} \times P^{3,3549}$
	≥ 18	$FEO = 1,3229 \times 10^{-7} \times P^{5,5789}$

P = Peso bruto total sobre o eixo

Tabela 6 – Expressões para obtenção de equivalência de operações (AASHTO)

Tipos de eixo	Equações (P em tf)
Simples de rodagem simples	$FEO = \left(\frac{P}{7,77} \right)^{4,32}$
Simples de rodagem dupla	$FEO = \left(\frac{P}{8,17} \right)^{4,32}$
Tandem duplo (rodagem dupla)	$FEO = \left(\frac{P}{15,08} \right)^{4,14}$
Tandem triplo (rodagem dupla)	$FEO = \left(\frac{P}{22,95} \right)^{4,22}$
P = Peso bruto total sobre o eixo	

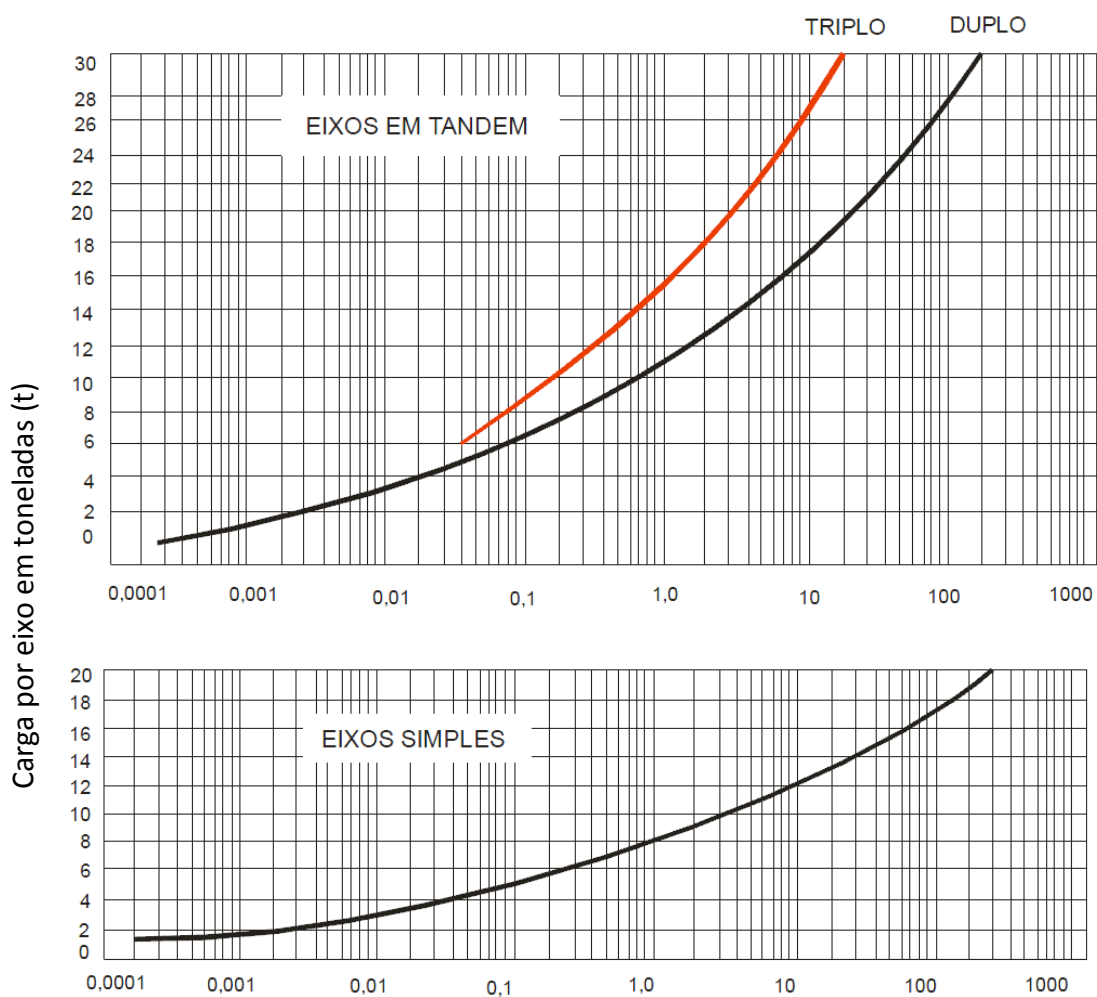


Figura 7 – Fatores de equivalência de operação (DNIT)

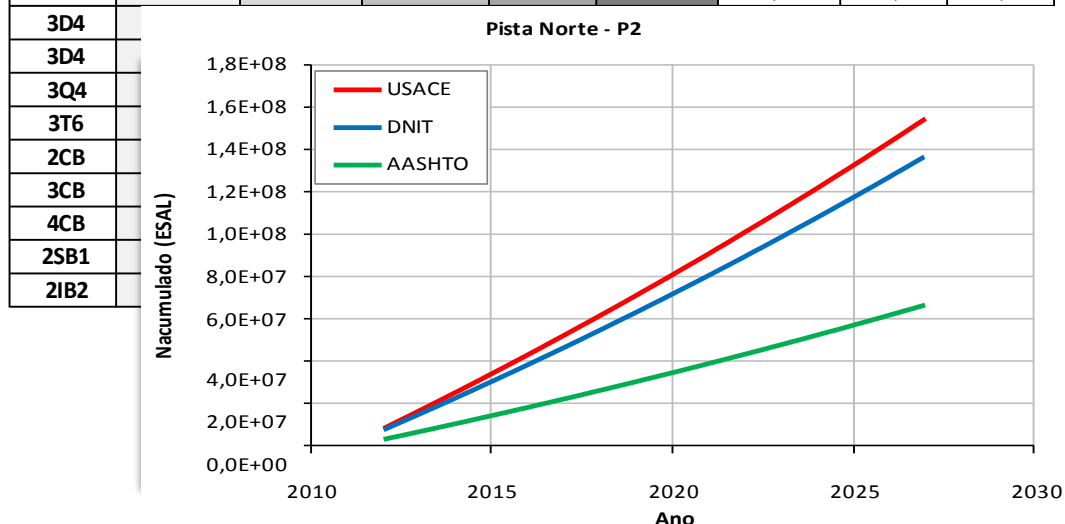
Na Tabela 7 a seguir são apresentados os cálculos dos fatores de equivalência de operações para diferentes tipos de eixo para as distintas metodologias descritas anteriormente para todas as classes de veículos apresentados na Figura 5 (Classificação DNIT). Conforme observado nos valores da tabela, em função da metodologia utilizada são encontradas diferenças significativas entre os fatores de equivalência.



Um fato importante a ser observado diz respeito às condições nas quais foram desenvolvidos estes modelos. Os Fatores de Equivalência de Cargas empíricos utilizados no meio rodoviário brasileiro foram desenvolvidos sob condições específicas de clima (pluviometria, temperatura, congelamento e degelo), solos do subleito (sem a ocorrência de solos tropicais) e, principalmente, solicitações do tráfego (carga por eixo, pressão de enchimento dos pneus, tipo de eixo, tipo de pneu e tipo de suspensão), diferentes das que prevalecem no Brasil. Apresentam, portanto, limitações inerentes, pois não permitem a extrapolação de resultados quando são consideradas situações distintas daquelas admitidas quando de sua elaboração.

Tabela 7 – Tabela comparativa de fatores de equivalência (AASHTO, USACE e DNIT) para todas as classes de veículos comerciais segundo classificação do DNIT (2006)

Classe	Tipo de Eixos					Fatores de Equivalência		
	ESRS (6,0t)	ESRD (10t)	ETD (13,5t)	ETD (17t)	ETT (25,5t)	AASHTO	USACE	DNIT
2C	1	1	0	0	0	2,72	3,57	3,20
3C	1	0	0	1	0	1,97	8,83	7,20
2S1	1	2	0	0	0	5,12	6,86	6,20
4C	1	0	0	0	1	1,89	9,58	8,70
4CD	2	0	0	1	0	2,30	9,10	7,40
2S2	1	1	0	1	0	4,36	12,12	10,20
2I2	1	3	0	0	0	7,51	10,15	9,20
3S1	1	1	0	1	0	4,36	12,12	10,20
2C2	1	3	0	0	0	7,51	10,15	9,20
2S3	1	1	0	0	1	4,28	12,87	11,70
3S2	1	0	0	2	0	3,61	17,38	14,20
2I3	1	4	0	0	0	9,91	13,44	12,20
2J3	1	2	0	1	0	6,76	15,41	13,20
3I2	1	2	0	1	0	6,76	15,41	13,20
2C3	1	2	0	1	0	6,76	15,41	13,20
3C2	1	2	0	1	0	6,76	15,41	13,20
3S3	1	0	0	1	1	3,53	18,13	15,70
3I3	1	3	0	1	0	9,15	18,70	16,20
3J3	1	1	0	2	0	6,01	20,66	17,20
3C3	1	1	0	2	0	6,01	20,66	17,20
X	1	0	1	0	0	1,22	8,83	3,20
3D3	1	1	0	2	0	6,01	20,66	17,20





3.4.2 Fatores de influência na estimativa do carregamento real do tráfego

Além das diferenças na estimativa do número N em função da metodologia adotada para definição dos fatores de equivalência, outros problemas afetam a estimativa real do carregamento imposto pelo tráfego que circula nas rodovias, estes problemas são abordados de forma rápida a seguir e dizem respeito ao excesso de carga e a pressão de inflação dos pneus.

- **Excesso de cargas**

É de conhecimento do meio rodoviário, que os excessos de cargas não apenas degradam o pavimento em velocidades aceleradas, causando a falha prematura de novos pavimentos ou reabilitações, mas também causam um grande risco operacional, levando muitas vezes a acidentes de grandes proporções.

- **Pressão de inflação dos pneus**

Um sério problema que afeta o desempenho dos pavimentos e aumenta a degradação prematura dos mesmos é a falta de controle da pressão de inflação de pneus dos veículos comerciais. A pressão de inflação vigente é de 80 psi (5,62 Kgf/cm²), porém a pressão de inflação utilizada na prática fica em torno de 100 psi (7,03 Kgf/cm²).

A consequência é a alteração da distribuição de tensão, causada pelo aumento da pressão de contato, que é admitida como igual à pressão de inflação do pneu. Este aumento da tensão de contato acelera a degradação do revestimento em função do aumento da tensão de cisalhamento gerada na região de contato pneu-pavimento.

O incremento das pressões de inflação contribui para a redução da vida de fadiga do pavimento, aumentando a incidência de trincas e de deformação permanente correspondente às trilhas de roda.

A pressão dos pneus tem pouco efeito na fadiga de pavimentos rígidos, mas um grande efeito nos pavimentos flexíveis. Um aumento de 20 psi na pressão pode aumentar o dano por fadiga nos pavimentos flexíveis consideravelmente.

As leis de uso das estradas deveriam ser modificadas para limitar as pressões recomendadas (marcadas nas laterais dos pneus) dos pneus dos caminhões, mais uma folga de 15 psi para o aumento da pressão devida ao calor. Incluir-se a verificação da pressão dos pneus nas atividades de conferência de peso, seria um meio rápido e efetivo para reduzir os danos às estradas que são atribuídas a esta causa.

3.5 IMPORTÂNCIA DO WIM PARA CARACTERIZAÇÃO DO TRÁFEGO

Atualmente, como resultado do avanço relacionado às pesquisas destinadas a representação do comportamento das estruturas mediante as solicitações do tráfego, observa-se a tendência na substituição da tradicional base puramente empírica pela empírico-mecanística. Neste quesito um dos métodos mais recentes foi proposto pela



National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) no projeto 1-37 A, o Método AASHTO 2002, que inseriu um novo conceito para caracterização do tráfego: os espectros de carga por eixo (*Axle Load Spectra*).

Ao empregarem-se métodos mecanísticos, (nos quais se calculam tensões, deformações e deslocamentos no pavimento e os comparam a valores admissíveis) é possível considerar o espectro de carga (porcentagem de cada tipo de veículo comercial com suas configurações e cargas de eixo) e fatores de crescimento de tráfego (crescimento do volume de tráfego) e determinar o dano que veículos reais causarão ao pavimento, utilizando-se qualquer configuração de carga sem a necessidade de transformá-la com algum fator de equivalência (como quando se trabalha com o número N) (Garcia, 2010).

Os avanços nas tecnologias de modelagem e nas capacidades computacionais nos últimos anos, juntamente com iniciativas de programas de avaliação de desempenho de pavimentos, como o *Strategic Highway Research Program* (SHRP) e o *Long Term Pavement Performance* (LTPP), levam a metodologias de dimensionamento de pavimentos mais precisas.

Melhor caracterização de materiais que se baseiam em propriedades fundamentais de engenharia para determinar o estado de tensões e deformações, características do tráfego, clima e avaliação de desempenho de seções de pavimento in situ, levaram a uma maior necessidade rumo a um método de dimensionamento mecanicista. Este método é apresentado no novo *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide* (MEPDG) desenvolvido através da *National Cooperative Highway Research Program* (NCHRP) Projeto 1-37A e NCHRP Projeto 1-40D.

Os dados de tráfego são um dos fatores chave na análise estrutural de pavimentos pelo MEPDG. Muitos dados de entrada são requeridos com relação ao tráfego. A abordagem através do ESAL (eixo padrão) utilizada nas versões anteriores do guia de dimensionamento de pavimentos, não é requerida para o MEPDG. O guia passa a utilizar o espectro completo de carga por eixo, para cada tipo de eixo. Esse espectro é obtido através do processamento de dados de pesagem em movimento (WIM).

Espera-se com esta pesquisa demonstrar que o conhecimento já existente sobre as tecnologias disponíveis de WIM nos permitem escolher adequadamente um sistema a ser implantado, e obter com sucesso dados de pesagem do tráfego durante um longo período de tempo. Para tanto, o principal produto a ser obtido será a classificação dos veículos comerciais rodantes na rodovia em classes de peso. Isto permite, por exemplo, a determinação dos fatores de distribuição de eixos de carga (Figura 8) sugerido pelo Guia da AASHTO 2004 para utilização do MEPDG para análise do desempenho de pavimento.

No Brasil, apesar de já haver alguns estudos desenvolvidos acerca da pesagem em movimento, não se teve acesso a informação de que haja no Brasil uma implantação plenamente funcional para o propósito de análise do amplo espectro das cargas rodantes nas rodovias Brasileiras. A constante mudança nos veículos no país, associado a crescente demanda de transporte de cargas, apresenta-se como um novo cenário bastante diferente daquele há alguns anos atrás.

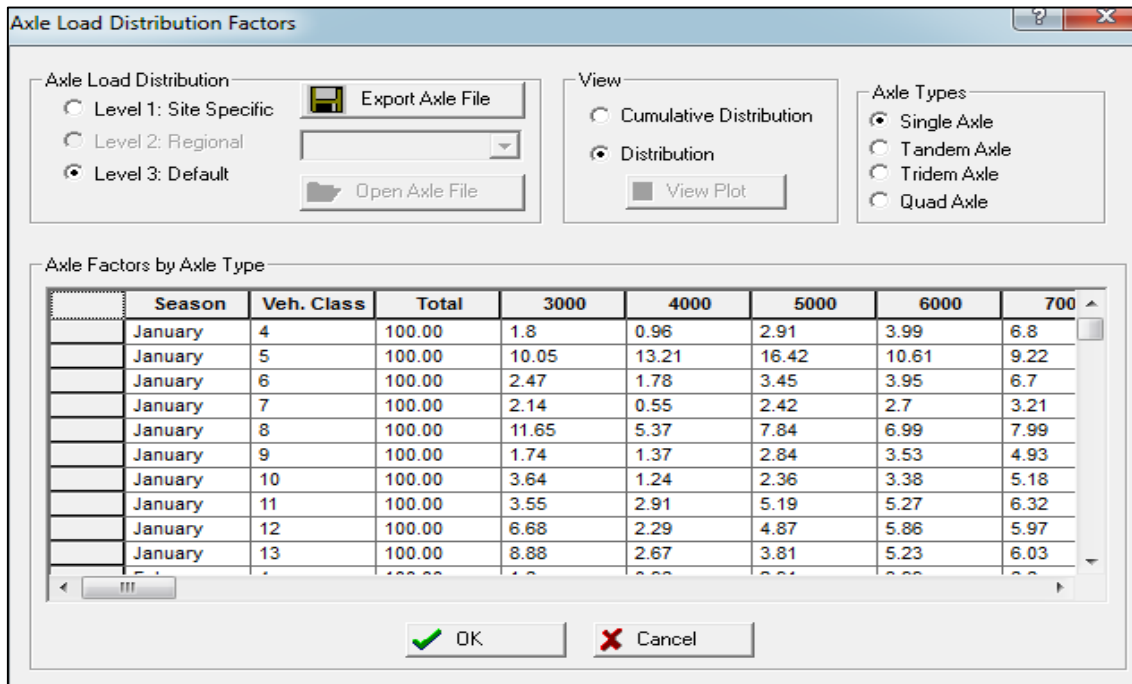


Figura 8 – Quadro de distribuição dos fatores de distribuição de eixos de carga no Guia da AASHTO 2004 (Software MEDPG)

A pesagem em movimento de veículos em alta velocidade (velocidade operacional da via) está sendo pesquisada por diversos órgãos internacionais para se tornar uma ferramenta automatizada do controle do transporte de cargas, além de proporcionar aos projetistas de pavimentos rodoviários importantes dados como volume de tráfego e horários de ocorrência, velocidade, classificação do veículo baseada no número e no espaçamento de eixos. Esse conjunto de informações futuramente podem ser considerados/incluídos em métodos de dimensionamento mais realistas/precisos proporcionando pavimentos menos suscetíveis à degradação prematura.

Entende-se que os dados coletados nesta pesquisa farão parte de um importante banco de dados para melhor compreensão dos tipos de cargas que rodam numa das principais rodovias do estado, e que os dados também desenharam um cenário que até o presente momento é inferido com base em uma série de hipóteses; o uso de métodos que empregam o empirismo na caracterização do tráfego, elaborados para condições totalmente diferentes das encontradas atualmente, principalmente no Brasil, podem gerar resultados divergentes aos da real situação em campo conforme visto anteriormente. Com a implantação de um sistema de WIM, tais hipóteses poderão ser refinadas e novas diretrizes de projeto traçadas.



4 ESCOLHA DO SISTEMA DE WIM PARA IMPLANTAÇÃO

Como foi visto nos Capítulos anteriores há uma série de evoluções já realizadas acerca dos sistemas de pesagem em movimento. Mundo afora os sistemas existentes são de diversas qualidades, graus de confiabilidade, preços, tipos de instalação entre outros. Discute-se a seguir um pouco sobre a escolha feita para a razão deste projeto.

4.1 PREMISSAS CONSIDERADAS PARA ESCOLHA DO SISTEMA UTILIZADO

Para o propósito da realização desta pesquisa alguns elementos chave precisaram ser analisados no intuito de que a instalação de um sistema de WIM pudesse alcançar os objetivos propostos, são eles:

- Primordialmente, a escolha deve ser um sistema já existente, pronto para instalação e uso e que tenha o menor potencial de desenvolver problemas ao longo da pesquisa, ainda que nunca possa se garantir tal fato. Devido ao fato da pesquisa ser de curta duração e também do objetivo principal ser o de avaliar o espectro de cargas, a parte eletrônica do equipamento não está sendo questionada, diferentemente do projeto DNIT/UFSC que olhou sobretudo deste ponto de vista.
- Num segundo momento, dos mais importantes itens a serem investigados é a acurácia, confiabilidade do sistema e facilidade de uso que deve ser levado em consideração. Sabe-se que o sistema deverá apresentar características mínimas de precisão e operação que permita coletar dados que permita a determinação do espectro de cargas na rodovia BR-290/RS no trecho da Freeway, com a melhor confiabilidade disponível.
- O sistema deverá ser também de fácil aquisição no país, dentro de tempo hábil. Sabe-se que os trâmites burocráticos de importação podem levar a inexequibilidade desta pesquisa caso não se consiga alcançar a compra do equipamento nos primeiros meses de projeto. Daí a necessidade de uma das primeiras etapas contemplar a sugestão por compra de um equipamento.
- Consolidadas as primeiras anteriores para escolha do sistema, há ainda de se suprir o hiato que há entre equipamento e tecnologia disponível no Brasil associado às condições locais. Ou seja, o equipamento deve ser compatível com a transmissão de tecnologia de informação disponível na Concessionária, haja visto que os problemas de armazenamento, coleta de dados e análise antecipados são muito grandes. O volume de dados a serem coletados é deveras volumoso o que poderá trazer problemas caso não se tenha uma transparência entre os sistemas e que não seja possível realizar uma confiável comunicação entre o equipamento de WIM e o servidor de dados pretendido. O sistema também deverá contar com um software possível de analisar os dados obtidos. Por mais que este tratamento pareça numa primeira instância relativamente simples, basta olhar as várias pesquisas que visam



a padronização dos protocolos de armazenamento de dados que se verá a dificuldade de se tratar com volume tão grande de dados.

- Finalmente, também deverá ser levando em consideração o potencial uso desta ferramenta futuramente. Ou seja, que o sistema seja compatível com as exigências atuais de tráfego de dados, sistema de coleta de informação, usabilidade em rodovias brasileiras e adaptabilidade para o cenário brasileiro.

4.2 PESQUISA DE FORNECEDORES

Em função das visitas realizadas previamente na pesquisa DNIT/UFSC e que foram devidamente documentadas, pareceu que o melhor curso de ação foi iniciar pelo levantamento dos sistemas já existentes no Brasil para que se pudesse de antemão ter os equipamentos mais próximos e que poderiam facilitar a realização da pesquisa.

A primeira consulta feita foi à Pattrafic (<http://pattraffic.com.br/>), empresa parceira no projeto supra citado. Conforme discussões feitas com a empresa, apesar da evolução decorrida da realização daquele projeto, não houve qualquer aplicação efetiva em campo que tenha resultado. Houve grande dificuldade, portanto, de se acessar informações sobre o andamento do projeto no Brasil e não se chegou a conseguir na fase inicial do projeto uma estimativa de custos para a implantação experimental objeto desta pesquisa.

Houve também uma tentativa de comunicação com a empresa Datatraffic (<http://www.datatraffic.com.br/>) que possui o chamado sistema B-WIM ou Si-WIM que consiste na instalação de sensores em pontes como discutido no Capítulo anterior. Também com a empresa consultada não houve evolução sobre a parte de orçamentação e disponibilidade para instalação deste equipamento na implantação experimental.

A dificuldades dos fornecedores em fazer tal cotação era sobretudo devido a dificuldade de se estimar a quantidade de serviços que deveriam contemplar haja visto a sua incipiência no Brasil. Face o desconhecimento da tecnologia, há uma grande resistência de fornecedores que se disponham a expor seu equipamento a testes sem conhecer com maior profundidade o propósito da pesquisa.

Finalmente a única empresa a que se teve melhor acesso de informação e disponibilidade de auxílio na composição dos equipamentos necessários foi a empresa Tracevia (<http://tracevia.com.br/>), que já dispunha de contatos prévios com a Concessionária o que facilitou as tratativas. A Tracevia é uma empresa Portuguesa que representa os equipamentos da empresa Inglesa TDC (<http://www.tdcsystems.co.uk/>), grande fornecedora de sistemas WIM.

Considerando-se que a notícia de aprovação desta pesquisa ocorreu apenas no início de Fevereiro e que, em função do comprometimento dos pesquisadores envolvidos com atividades acadêmicas, houve necessidade de um rápido agendamento da visita de fornecedores para aquele mesmo mês, foi feito uma reunião com a empresa Concessionária para determinação das diretivas.

Chegou-se assim às seguintes conclusões:



- Baseado nas discussões prévias realizadas com as empresas Pattraffic e Datattraffic que não resultaram em evolução frutífera sobre a disponibilidade de sítios em uso no Brasil que tivessem a tecnologia a ser instalado para discussão e investigação, deveriam ser buscadas alternativas a estas.
- A empresa Toledo Brasil (<http://www.toledobrasil.com.br/>) deveria ser consultada sobre a existência de sistemas de pesagem em movimento de alta velocidade. Após contato com a mesma, retornou-se negativamente informação de disponibilidade da empresa em discutir sobre os sistemas disponíveis e/ou preços de equipamento para instalação.
- Considerando-se que mesmo as empresas brasileiras com potencial de fornecimento do equipamento não dispunham da tecnologia "em casa" e que aquelas potenciais de serem instaladas seriam necessariamente importadas, o mais sensato seria o apontamento de um potencial fornecedor estrangeiro. Considerando a verba disponível para visita ser restrita, não poderia ser ampliada grandemente a pesquisa em função do recursos.
- A empresa Tracevia era aquela que dispunha de tecnologia de potencial uso, já amplamente instalada em vários países da Europa e outros continentes, e que se apresenta com disponibilidade de vende do equipamento diretamente no Brasil e com fornecimento de assistência técnica nacional - fator também apontado de preocupação na reunião.
- Sugeriu-se, então, que a visita deveria contemplar o fornecedor TDC Systems, fabricante dos equipamentos daquela representante, haja visto que a tecnologia por eles utilizada era a de sensores piezoelétricos que de acordo com a revisão bibliográfica se apresentava com maior potencial de uso em função de sua precisão, disponibilidade, acurácia e aplicabilidade em pavimentos asfálticos típicos do Brasil, ficando assim em linha com as premissas buscadas descritas anteriormente.
- Acordou-se, assim, que o foco da visita era a de visitar um fabricante de um sistema tipo HS-WIM com sensores piezoelétricos, bem como ter um retorno sobre um cliente daquele fabricante de maneira a validar seu uso. Considerando-se que este tipo de sistema é o vastamente empregado, a partir da visita no potencial fornecedor, seria possível no melhor evento ter acesso ao sistema que iria ser utilizado, ou da condição menos favorável caso outro fornecedor fosse escolhido, ter-se-ia acesso ao sistema de fabricação, instalação e operação de um sistema já consolidado no mercado e cuja nacionalidade do fabricante - Inglesa - impunha elevado grau de confiabilidade haja visto seu amplo reconhecimento inovativo no segmento de transportes.
- Por fim, discutiu-se que devido às restrições orçamentárias e tempo exíguo que face à ampla discussão já feita pelo projeto DNIT/UFSC com visita em outros países, que a visita deveria se concentrar na Inglaterra que não só não havia sido ainda visitada para o propósito de WIM no âmbito brasileiro, mas também poderia vir a ser o fornecedor do sistema a ser utilizado por ser a única empresa entre as consultadas que se dispuseram até o mês de fevereiro a ser parceira neste projeto.

O sistema de WIM que se mostrou de potencial uso foi sem dúvida de acordo com a literatura a configuração de equipamento chamado "Piezo+Loop+Piezo". A instalação de um loop magnético entre os sensores WIM utilizados - no caso piezoelétricos - é necessário para que seja feito a classificação dos veículos. Apenas com esta classificação é possível



saber o tipo de eixo e sua carga limite em função da legislação vigente. Em tempo, como o propósito é justamente fazer a classificação dos espectro de veículos, então, sem um contador de tráfego associado, não há adequada funcionalidade do sistema. Ademais, é justamente o contador de tráfego que é utilizado como gatilho para reconhecimento da passagem do veículo e seus eixos no sistema WIM; ou seja, são indissociáveis.

De acordo com a revisão da literatura feita, há duas possibilidades para montar um sistema WIM com a acurácia necessária, ou se instala sensores de alta precisão como o da Kistler - que não só é um sensor muitas vezes mais caro que os sensores piezoelétricos, mas que também não se adapta bem a pavimento com trilha de roda por ser uma barra muito rígida - ou então se instalam maior número de linha de sensores; ou seja, neste último várias leituras são feitas, uma em cada linha de sensores, de maneira que seja possível saber com maior precisão o peso lido.

Em função do valores elevados deste tipo de sistema, parece ser prática comum como a pesquisa realizada que sejam instalados duas linhas de sensores em adição a um contador de tráfego - configura esta referenciada piezo + loop indutivo + piezo. Esta foi, assim, a configuração escolhida para avaliação e discussão.

4.3 VISITA A EMPRESAS FABRICANTES DO SISTEMA

Em função da opção tomada em conjunto com a concessionária de visitar a Inglaterra, entrou-se em contato com a Empresa TDC através da Tracevia para que fosse viabilizada uma visita à fábrica da empresa com discussão sobre o equipamento de WIM produzido pela empresa. Também seria foco de discussão a instalação e operação do equipamento bem como detalhamento dos sensores e equipamentos.

No dia 13 de fevereiro foi realizada a visita à fábrica da TDC que produz o sistema chamado de HI-TRAC (Figura 9); este sistema conjuga a leitura dos sensores piezoelétricos bem com contadores de tráfego a partir de laços magnéticos indutivos, permitindo assim o pleno funcionamento de um sistema WIM.

O sistema de WIM consiste da implantação de um equipamento de aquisição e controle de dados (como o HI-TRAC), mais sensores piezoelétricos (Figura 10). Na visita realizada foi possível ver no depósito da fábrica vários tipos de equipamentos, entre eles um sistema TDC que havia sido comercializado com os Emirados Árabes e que contava com um sistema TDC com sensores Kistler de Quarto conforme mostra a Figura 11 e Figura 12.

A visita se iniciou com uma discussão com o diretor técnico da TDC e foi seguida de um tour pela empresa que passou pelo depósito e pelos setores de desenvolvimento. A visita foi encerrada com uma demonstração de um sistema de WIM acessado remotamente da sede da TDC, na qual se pode visualizar o sistema em funcionamento com a detecção em tempo real da pesagem que estava ocorrendo.



Figura 9 - Fábrica da empresa TDC com sistemas HI-TRAC



Figura 10 - Sensor piezoelectric Measurement Specialties e resina usada na instalação



Figura 11 - Sistema TDC montado para operação com sensores Kistler a ser embarcado para cliente nos Emirados Árabes



Figura 12 - Sensor Lineas da marca Kistler; sensores de quartzo piezoelétrico



Figura 13 - Demonstração de um sistema WIM em funcionamento remoto da sede da TDC

A discussão com a equipe técnica foi de grande valia, e os pontos a serem salientados são os seguintes:

- Iniciou-se a conversa com a discussão sobre os sistemas de pesagem disponíveis com os diversos tipos de sensores e recomendação de uso. De acordo com o diretor técnico, apesar de haver sensores como o Kistler de elevado nível de precisão (95%), seu custo pode chegar a ser 15 vezes mais elevado do que um piezoelétrico convencional, e o ganho de precisão é de apenas 5% quando comparado a um sistema com duas linhas de sensores convencional.
- O Reino Unido (RU) usa hoje na massiva maioria de seus sítios com WIM, duas linhas de sensores piezoelétricos convencional + loop magnético para classificação em todas as faixas de tráfego nos pontos instalados.
- Hoje o RU se vê como estando na vanguarda desta tecnologia já que o utiliza efetivamente no monitoramento de rodovias e fiscalização de veículos sobrecarregados.
- No que tange a facilidade de instalação, afirmou o direto que há elementos base a serem observados; considerando que a resina utilizada e a precisão do corte onde serão instalados os sensores serem os elementos base para um bom funcionamento, o restante da operação é simples e a empresa Tracevia, sua representante do Brasil possui todo o know-how já tendo instalado em mais de 50 ocasiões os mesmos.
- O sistema recomendado como sendo de custo acessível e que comporta a configuração para um sistema Piezo+Loop+Piezo em duas faixas de tráfego é o HI-TRAC100+ (ficha técnico em anexo).



- Não há qualquer limitação ao sistema HITRAC ser utilizado com backend de um sistema; ou seja, ele é adaptável a um possível sistema de segurança de coleta de dados que possa ser desenvolvido no Brasil para compatibilidade, por exemplo, de um sistema de segurança de informação a ser utilizado para fiscalização em rodovias federais.
- A TDC está aberta a compatibilizar o HITRAC com o protocolo NTCIP haja visto que a Agência Reguladora nacional - ANTT, poderá ter interesse em se valer deste estudo para motivar a instalação de outros sistemas de WIM e que poderá ter interesse em coletar diretamente tais dados.
- No que se refere à instalação em um Simulador de Tráfego para a validação do sistema HITRAC, poderá haver necessidade de programação de uma nova EEPROM - programa de operação do hardware do HITRAC - que possa reconhecer a passagem de um semi-eixo e contabilizá-lo como um veículo para fins de calibração nesta pesquisa. A TDC poderá fornecer este programa específico, se comprometendo a firmar parceria na solução de problemas advindo desta questão que ocorreria com qualquer outro sistema instalado.
- No que tange o fornecimento no Brasil do sistema, bem como sua manutenção, afirmou já possuir na Tracevia um representante com conhecimento técnico e cuja tramitação de importação já é superada já tendo inclusive fornecido equipamentos de contagem de tráfego para a Concessionária Bahia Norte.
- O sistema HITRAC na função WIM tem se apresentado sólido, sem problemas operacionais para os clientes da empresa e vê no mercado nacional brasileiro um promissor parceiro para desenvolvimento, comprometendo-se a auxiliar nas tratativas para fornecimento e subsidiando parte do investimento técnico necessário para superar a fase de validação.

4.4 VISITA AO CHECK-SITE DA VOSA

Um dos importantes aspectos da visita realizado à Inglaterra era a de que pudesse ser avaliado um sistema em funcionamento de WIM. Para tanto, entrou-se em contato com a Highways Agency - HA, agência responsável pela malha rodoviária britânica.

A HA é responsável pela operação, construção, manutenção e conservação das rodovias naquele país. No que se refere às questões veiculares administrativas como licenciamento, controle de frota, padrões de rodagem e testes veiculares, existe uma operadora chamada VOSA (Vehicle & Operator Services Agency) responsável para tanto.

Ambas as agências acabam, desta forma, por dividir o papel relativo à pesagem de veículos, já que a HA é diretamente afetada pelo peso dos veículos uma vez que é responsável pelo pavimento, ao passo que a VOSA é a Agência responsável pela fiscalização do excesso de carga. Assim, ambas uniram forças para em meados de 2009 iniciar um projeto de implantação de WIM que permitisse a fiscalizar as rodovias para coibir o excesso de carga da maneira mais racional e automatizada possível.

Assim, foi criado o projeto chamado "WIMS & ANPR" (Weigh in Motion Systems & Automated Number Plate Reading) que apesar de já serem aplicadas anteriormente no UK, eram anteriormente sistemas independentes.



Com a união deste sistema, foi possível implantar com sucesso em mais de 10 sites um sistema conjugado de reconhecimento de placa e pesagem em movimento que permitiu a agência VOSA melhorar o seu sistema de fiscalização.

Os principais objetivos do projeto foram:

- Unir duas tecnologias existentes mas que até então funcionavam de forma independente. O casamento entre a informação de peso do veículo e seus eixos, conjugadamente com seu registro permite não apenas a detecção da infração - já que agora se tem acesso à todas as características do veículo não apenas pelo reconhecimento de sua assinatura de massa metálica, mas pelo registro pelo órgão competente - mas também, monitorar as empresas que frequentemente operam ilegalmente.
- Ampliar a operação de monitoramento da rodovia num projeto piloto à ampliação dos trabalhos iniciados principalmente em áreas de pontes. Na Inglaterra e Escócia, o projeto de WIM iniciou-se principalmente devido às demandas de restrições de peso em pontes. Hoje com o sistema WIM&APNR é possível ter uma monitoração constante e efetiva da travessia das pontes com grande êxito na coibição de sobrecargas.
- Conectar o sistema de WIM&APNR à rede NRTS (National Roads Telecommunications Services) que compreende CFTV, Telefones de emergência, Painéis de mensagem variáveis, entre outros. Foi desenvolvido um sistema que permitisse trafegar as informações do WIM&APNR nesta rede.
- Melhorar a acurácia dos sistemas de fiscalização que agora conseguem ter alvos mais precisos para nas ações de multa, bem como aumentar o número de veículos e motoristas com risco de acidente em função do excesso de carga, retirados da rodovia por ação dos agentes fiscalizadores.

Em consulta à HA, foi possível agendar uma visita a um site de verificação (Check Site) utilizado pela VOSA para operação do sistema WIM&APNR. O site disponibilizado para visita foi o de Doxey nas proximidades de Birmingham que conta com o sistema instalado em ambas as pista Norte e Sul instalados.

A visita decorreu-se no dia 15/02 pela manhã com atenção do Sr. Malcon da agência VOSA. O Sr. Malcon participou do todo o projeto e desenvolvimento do sistema WIM&APNR, tendo sido o principal responsável no desenvolvimento do software realizado pela empresa Civica. O local escolhido foi Doxey que fica nas proximidades de Birmingham, conforme mapa da Figura 14, com vista aérea em detalhe na Figura 15. O site de verificação é utilizado para conferência dos pesos dos veículos que passam pelo WIM e apresentam potencial de sobrecarga. Como o sítio fica situado uns 5 a 6km antes dos sensores - Figura 16, o usual é uma viatura da VOSA ficar de sobreaviso e quando houver indício de veículo com possível infração, o mesmo é escoltado até o site de verificação.

Não foi permitido fotos no local pela agência, mas várias informações foram discutidas e a Figura 17 mostra em detalhe uma tela do software desenvolvido pela empresa Civica para a HA e VOSA para operação do sistema WIM&APNR.



Figura 14 - Sítio visita em Doxey - proximidades de Birmingham



Figura 15 - Vista aérea do sítio de Doxey utilizado para as operações de fiscalização



Figura 16 - Sensores instalados nas proximidades do sítio de Doxey

Entre os principais pontos discutidos durante a visita, alguns devem ser salientados por serem os mais relevantes ao desenvolvimento desta pesquisa:

- sistema WIM&APNR utilizado pela VOSA/HA aplica no site de Doxey dois tipos diferentes de equipamentos. Um da TDC (<http://www.tdcsystems.co.uk/>) e outro da Applied Traffic (<http://www.appliedtraffic.co.uk/>). Ambos os sistemas são compostos por sensores piezoelétricos na configuração Piezo+Loop+Piezo.
- Uma das preocupação da VOSA/HA era de que os fabricantes utilizados dos equipamentos de WIM tivessem seus sistemas capazes de serem conectados a um sistema centralizado que pudesse então se conectar ao sistema de APNR; ou seja, que os sistemas pudessem funcionar como um "back-end" conectados a um software da própria agência fazendo o "front-end".
- A VOSA/HA contrataram uma outra empresa - Civica - responsável pelo desenvolvimento de uma ferramenta que conjugasse tanto o sistema WIM como o APNR e pudesse então conectá-lo à rede NERTS da HA.
- Ambos os equipamentos utilizados naquele sítio se comportam de forma transparente e o anfitrião da visita relatou não haver qualquer diferença operacional entre os dois sistemas. Do ponto de vista do cliente, ambos fornecem a acurácia, confiabilidade e manutenção desejável sem qualquer empecilho.
- Perguntado sobre se a precisão do sistema era a desejada, foi relatado que desde que instalado o objetivo proposto pelo sistema foi atingido e que seria muito baixo a incidência de veículos que são levados ao sítio de verificação por apontamento do sistema e que não estão de fato sobrecarregados. Isto se traduz numa grande eficiência do sistema e redução do desconforto àqueles que trafegam dentro dos limites da lei.

Figura 17 - Tela do sistema de alterna WIM&APNR da Vosa

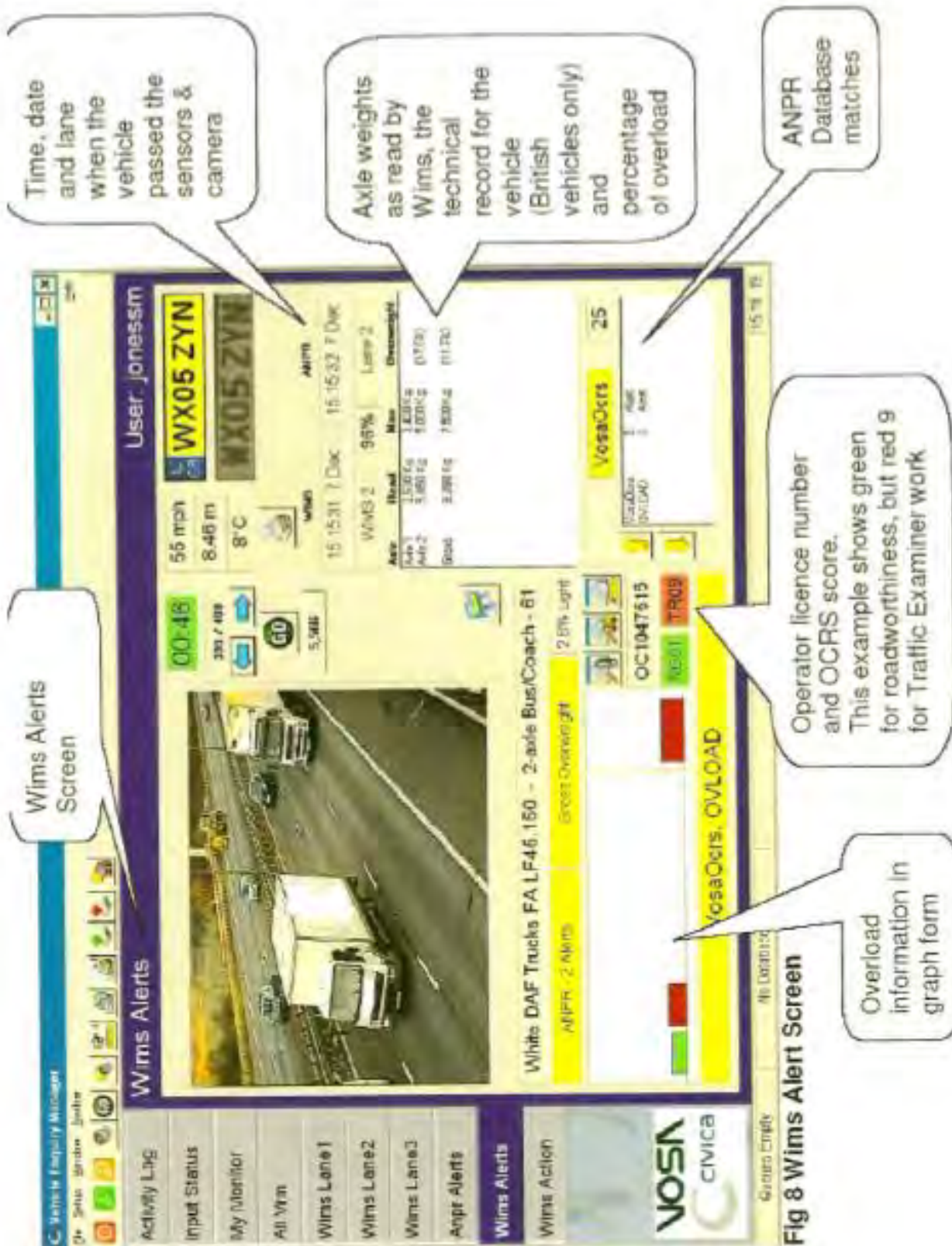


Fig 8 Wims Alert Screen



- O uso de um sistema que permita a avaliação do espectro de cargas em todas as três faixas de tráfego, iria requerer a instalação de um sistema superior ao HISTRAC 100+. O que ocorre é que o número de canais necessários por cada faixa na qual se intenciona instalar um sistema Piezo+Loop+Piezo, são três; um para cada sensor. Assim, o número disponível de canais é 6. Para que fosse instalado em todas as três faixas da Freeway, deveria se elevar o sistema para um Hi-trac EMU2, de custo mais elevado.
- O sistema de WIM deve se valer também de uma sonda de temperatura. Esta é utilizada para medir a temperatura do pavimento, cuja deformação deverá ser corrigida em função do gradiente térmico naquele instante. As correções já são previamente carregadas e apresentam excelente nível de repetibilidade.
- O sistema HISTRAC da TDC já vem pre-carregado com análise de tráfego segundo a FHWA; sistema amplamente utilizado mundo afora para classificação de veículos. No entanto, é possível personalizar a análise de veículos conforme demanda local sem qualquer problemas. Ou seja, é possível futuramente, caso se queira, montar uma especificação nacional para o HISTRAC de modo que a classificação dos veículos nacional seja feito automaticamente. Antecipa-se, no entanto, que para efeitos deste projeto não há necessidade de tal ação, podendo-se contar com a classificação FHWA sem qualquer problema.

4.5 PARECER FINAL SOBRE A VISITA REALIZADA

A visita realizada ao UK, apesar de ter sido planejada em um curto intervalo de tempo em detrimento da aprovação da pesquisa ter sido feito apenas dias antes da realização da viagem, se mostrou extremamente proveitosa. Foi possível antecipar ações a partir das discussões tidas, possibilitando uma melhor visão do projeto e também direcionando alguns temas mais específicos como a instalação, escolha de sensores, problemas com os testes a serem executados no simulador, entre outros. Com base na visita à empresa TDC, apoiado na revisão bibliográfica realizada e também na consulta à VOSA na viagem à Inglaterra, foi possível reunir-se com a Concessionária e fazer uma recomendação para aquisição do equipamento, como se segue.

4.5.1 RECOMENDAÇÃO PARA AQUISIÇÃO DO EQUIPAMENTO

Considerando-se toda a experiência adquirida e em discussão com a Concessionária Concepa, puderam ser tomadas algumas definições no que se refere à aquisição de um sistema de pesagem em movimento - WIM, para esta pesquisa. Abaixo são relatadas as recomendações a serem seguidas:

- A primeira opção claramente a ser feita é a de se utilizar sensores tipo piezoelétricos convencionais. O uso de strain-gages em pontes apresenta em uma primeira instância bastante incipiência de uso e também parece que a medição de veículos por classe seja bastante mais complexa. Em adição a exposição do sistema, por não



ser resinado e instalado dentro do pavimento, ficando com fios expostos, parece bastante susceptível a ação de vandalismo e também intempéries do tempo.

- O uso de sensores piezoelétricos convencionais - pequenos fios metálicos com uma cerâmica piezolétrica dentro, aceitam pequenas dobras sem prejuízo do seu funcionamento. Aceitam, assim, pequenas deformações permanentes, contrariamente ao sistemas Kistler Lineas. Apesar de mais precisos podem vir a representar problemas em pavimentos com pequena deformação permanente.
- Sistemas com uso da configuração Piezo+Loop+Piezo atingem usualmente confiabilidade de 90% e são, assim, a melhor custo benefício. Esta configuração é a sugerida para uso na Freeway.
- A empresa TDC apresentou-se como interessada parceira através da Tracevia e caso possua preço competitivo é fortemente recomendada haja visto que atende as questões presentes e futuras de tecnologia de transmissão de dados, tendo se colocado a disposição para discussões futuras inclusive sobre o protocolo NTCIP.
- A presença de uma representante da TDC no Brasil, através da Tracevia, poderá proporcionar forte impacto no que se refere a manutenção do equipamento e suporte para instrução de uso. Contornar problemas técnicos em projetos tão curtos quanto esse são vitais e achar um parceiro que esteja a bordo na solução de problemas é essencial.
- A TDC antecipou que o gatilho dos sistemas de pesagem em movimento é o loop magnético. Assim, para qualquer equipamento a ser adquirido deverá ser consultado o fabricante sobre a disponibilidade de customização do sistema para validação no Simulador de Trafego. A TDC colocou-se a disposição.
- Finalmente, importante aspecto é o fato da empresa VOSA no RU ter dado um feedback positivo da empresa TDC e seu sistema HI-TRAC o que mostra que caso escolhido, não se antecipa problemas operacionais. Ademais o fato do equipamento ser compatível para uso com back-end é promissor no que se refere à evolução do sistema para uso integrado entre Agência reguladora - ANTT/ PRF/Concessionária. Entende-se que a evolução de um sistema de reconhecimento de placa para acesso do banco de dados veicular do DETRAN será essencial e poderá embrionar a partir da implantação deste sistema.

Com as recomendações acima, fica apenas agora vinculado à pesquisa de preço para compra ou aluguel do equipamento aquele que melhor atenderá estas necessidades, lembrando que se propões a instalação pelo menos em duas faixas de tráfego - já que na faixa rápida pouco se espera ter fluxo de veículos pesados - comprando um total de 4 sensores piezoelétricos para a pista da Freeway mais dois loops magnético indutivos e um sistema capaz de coletar estes dados, bem como um sensor de temperatura para implantação entre os sensores piezoelétricos para efeitos de correção.

Para a implantação na pista experimental é necessário a instalação de duas linhas de sensores piezolétricos, um sensor de temperatura e um equipamento para coleta e análise de dados. Será necessário também uma licença de software operacional para cada instalação.



5 IMPLANTAÇÃO WIM NA PISTA EXPERIMENTAL LAPAV/UFRGS

O presente capítulo apresenta o desenvolvimento da segunda etapa da pesquisa, ou seja, a validação do equipamento nos aspectos técnicos e operacionais através de sua instalação em uma pista experimental solicitada por um Simulador de Tráfego.

A implantação experimental do sistema WIM na Área de Pesquisa e Testes em Pavimentos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (LAPAV/UFRGS) proposta neste projeto permitiu que o sistema fosse objeto de estudo para uma implantação acurada no que se refere à sua instalação física para melhor funcionamento, e também calibração do sistema através do uso de um Simulador de Tráfego, através do qual foram aplicadas cargas em movimentos (cargas e velocidade predefinidas) para ajuste dos sensores e hardware de aquisição de dados.

5.1 PISTA EXPERIMENTAL LAPAV/UFRGS- CARACTERÍSTICAS

Neste item serão apresentadas algumas características principais e a configuração da pista experimental que será utilizada para a validação e calibração do sistema WIM e sistema de aquisição de dados antes da sua instalação *on site* na BR 290/*Freeway*.

A configuração da pista experimental é apresentada nas imagens abaixo. O pavimento é construído sobre um subleito de argila, constituído de uma base de 30 cm de espessura de brita graduada e um revestimento de WMA (*Warm Mix Asphalt*) de 10 cm de espessura. Algumas características das camadas são apresentadas nos itens a seguir:

- **Subleito:** o material empregado na camada final de terraplenagem trata-se de uma argila vermelha de comportamento laterítico;
- **Agregados:** Os agregados utilizados tanto na base quanto na mistura asfáltica são oriundos da britagem de rocha basáltica da região de Triunfo/RS;
- **Base:** A base de brita graduada obedeceu a faixa granulométrica e o grau de compactação estabelecidos pelo caderno de encargos da SMOV- Porto Alegre;
- **Revestimento Asfáltico:** O projeto da mistura obedeceu à faixa C do DNIT, a mistura WMA foi projetada utilizando CAP 50/70 com adição de zeólitas.

A pista experimental sobre a qual encontra-se instalado o Simulador de Tráfego é constituída de 10 seções, sendo elas demarcadas de metro em metro conforme demonstrado na Figura 18 abaixo.

Possuindo aproximadamente 14m de comprimento a pista experimental possui uma extensão carregada de 8,0m que é dividida em três trechos principais, sendo eles: um trecho inicial de aceleração (1,5m), um Trecho Efetivamente Carregado (5,0m) e um trecho final de desaceleração (1,5m).

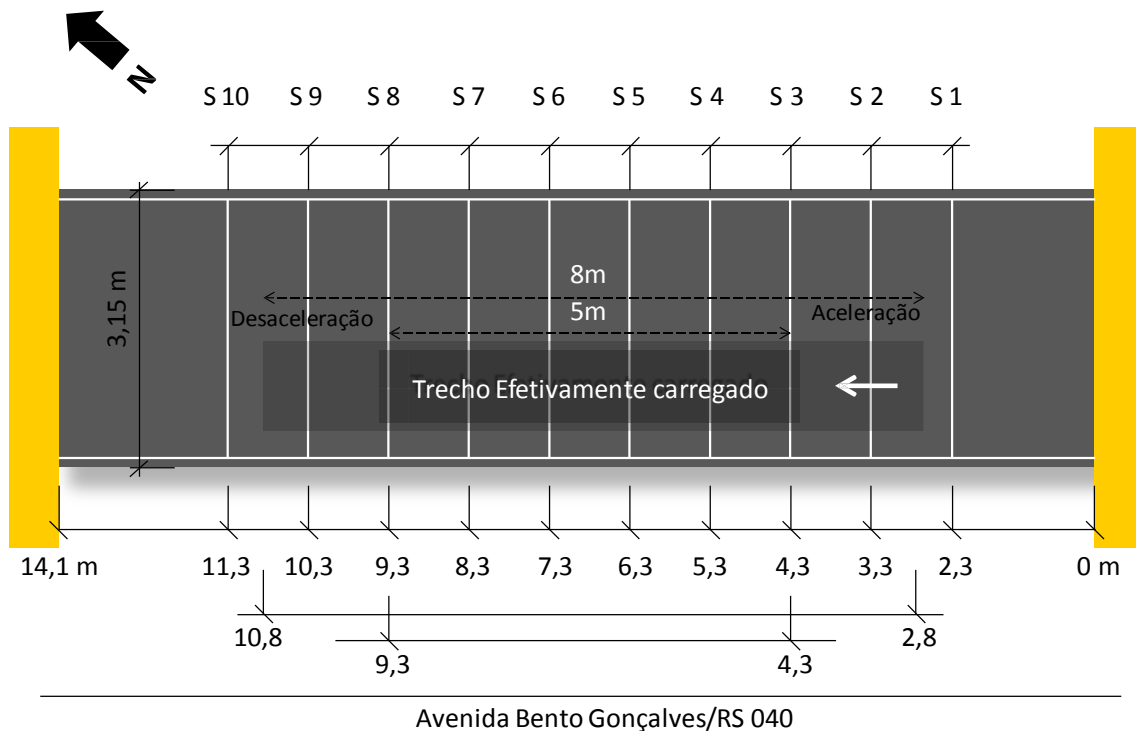


Figura 18 - Pista experimental da Área de Testes de Pavimentos LAPAV/UFRGS

A seção transversal da Pista Experimental é apresentada na Figura 19 e representa a configuração de camadas descrita anteriormente.



Figura 19 - Seção transversal da pista experimental

5.2 SIMULADOR DE TRÁFEGO

O simulador de tráfego utilizado nesta fase da pesquisa está localizado na Área de Pesquisa e Testes de Pavimentos no Campus do Vale da UFRGS tem aproximadamente 15m de comprimento, 2,5m de largura e 4,3m de altura, com um peso na faixa de 220 kN.

Uma visão geral do Simulador e alguns detalhes são apresentados na Figura 20.



Figura 20 - Visão geral e detalhes do Simulador de Tráfego LAPAV/UFRGS

O Simulador está equipado com pneus com lonas, tamanho 9 x 20 cm em um semi-eixo simples com rodas duplas, com cargas de eixos variando entre 82 kN e 130 kN. Foram estabelecidas relações entre a carga de eixo e a pressão de inflação nos pneus obtendo valores que variam de 0,53 MPa (82 kN) a 0,73 MPa (130 kN) (Fiorin, 2009).

O equipamento possibilita aplicação de ciclos de carga em espaçamentos de tempo entre 16 e 18 segundos, o que corresponde a uma variação entre 200 e 225 ciclos por hora respectivamente. Com uma velocidade média de deslocamento de 5 km/h, o equipamento possibilita a aplicação de até 65 kN de carga sobre o pavimento, em um curso total de atuação de 8 metros, com um curso de aceleração e desaceleração de 3 metros (Rohde, 2007).

A seguir são apresentados alguns detalhes técnicos e de funcionamento do simulador (Fiorin, 2009), uma descrição mais detalhada é apresentada em Núñez (1997):



- **Estrutura de suporte geral:** a estrutura é composta por painéis Bailey tipo BB.1 sobrepostos, servindo de reações as cargas e apoiada sobre duas vigas-caixão localizadas nas extremidades.
- **Sistema de guiamento do rodado:** o rodado pode ser simples ou duplo e está ligado a um carro, que tem seu deslocamento realizado sobre trilhos, tracionado por um cabo de aço. Este carro possui cinco rodas em cada lateral, as rodas promovem seu guiamento, sendo que três delas servem ao guiamento sob carga e duas delas servem ao guiamento no retorno para reposicionamento, durante um ciclo de aplicação.
- **Sistema de rodado:** o rodado é ligado ao carro através de um garfo articulado, que possui em sua extremidade um semi-eixo de caminhão regulável, para permitir o alinhamento do rodado, onde então é fixado.
- **Sistemas de acionamento:** o acionamento se dá por meio de um motor de indução trifásico de rotor bobinado, para regime intermitente, com freio eletromagnético, com potência de 15 CV e redutor. O motor aciona o rotor onde está o cabo de aço, mantido sempre tracionado através de mecanismo de esticador em uma das extremidades, responsável pelo movimento do carro.
- **Sistema de controle:** o equipamento é comandado através de um quadro de comando elétrico, tendo os sistemas acionados através de um microprocessador acoplado. O controle da velocidade de acionamento é feito através de um quadro de resistores.
- **Sistema de aceleração e desaceleração:** a aceleração e desaceleração são controladas pelo sistema de controle, através do acionamento do freio e do motor elétrico, e segundo um sinal elétrico originário de sensores óticos dispostos ao longo dos trilhos de guiamento do carro.
- **Sistemas de amortecimento:** composto por molas helicoidais, colocadas nas extremidades dos trilhos de guiamento, tendo como função parar o carro com segurança caso ocorra alguma falha no sistema de controle.
- **Sistema de aplicação de carga:** a aplicação de carga é feita através de uma unidade hidráulica comandada eletronicamente e de um cilindro hidráulico, ambos montados sobre o carro. A carga aplicada sempre com deslocamento em um único sentido, sendo o retorno realizado com o carro em suspensão, isso é feito para que se consiga reproduzir as condições de tráfego reais em uma rodovia.
- **Sistema de deslocamento transversal:** o deslocamento transversal é coordenado com o longitudinal, dessa forma se consegue impedir a formação de trilhas de passagem de roda em um único local. Frações deste deslocamento vão ocorrer quando o rodado retornar suspenso no início de cada ciclo. Este movimento é realizado pelo deslocamento de toda a estrutura sobre um elemento guia existente em cada uma das viga-caixão de apoio externas do equipamento. O movimento transversal pode ser programado com diversas larguras.

5.3 EQUIPAMENTO DE WIM (SENSORES PIEZOELÉTRICOS)

Considerando-se a experiência adquirida durante as etapas desenvolvidas até o momento através de uma ampla revisão bibliográfica sobre os sistemas de WIM disponíveis, seguida de visita à empresa fabricante TDC além de visita ao Check-Site da VOSA e em discussão com a Concessionária CONCEPA foram adotadas algumas definições no que se refere à aquisição de um sistema de pesagem em movimento para esta pesquisa.

Seguindo as premissas consideradas para a definição do sistema de pesagem a ser utilizado, elencadas no item “4.1 Premissas consideradas para escolha do sistema utilizado”, onde foram descritos alguns elementos chave necessários para alcançar os objetivos da presente pesquisa, definiu-se como descrito no item “4.5.1 Recomendação para aquisição do equipamento” conforme segue abaixo.

Resumidamente: optou-se pelo uso de sensores piezoelétricos convencionais (constituídos de fios metálicos com uma cerâmica piezoelétrica em seu interior). Este tipo de sensor apresenta a vantagem de aceitar pequenas dobras sem prejuízo de seu funcionamento. Não apresentam problemas em pavimentos com pequenas deformações permanentes. Sistemas com uso da configuração Piezo+Loop+Piezo atingem usualmente confiabilidade de 90% e são, assim, a melhor custo benefício. Esta configuração é a sugerida para uso na BR-290/RS, Freeway.

5.3.1 Sensores para pesagem em movimento e sistema de aquisição de dados (ROADTRAX® BL PIEZOELECTRIC AXLE SENSOR & HI-TRAC® 100+)

Na Figura 21 é apresentada uma imagem do equipamento e sistema de aquisição de dados juntamente com algumas informações técnicas importantes.



Figura 21 - Equipamento, sistema de aquisição de dados e informações técnicas

Ressalta-se que a configuração, tanto do equipamento quanto do sistema de aquisição de dados, utilizada na implantação experimental (solicitada por Simulador de Tráfego) apresenta algumas importantes diferenciações da convencionalmente utilizada em implantações nas rodovias.

Estas diferenças são descritas no item “5.3.3 Necessidades especiais para instalação na pista experimental LAPAV/UFRGS”, onde são apontadas as principais mudanças realizadas.

A pista experimental utilizada nesta etapa da pesquisa apresenta uma largura total de 3,15m, como a mesma é solicitada apenas por um semi-eixo poderia ter sido adotado um comprimento de sensor inferior à largura da pista, pois há somente a necessidade de que seja garantido um contato pleno entre as rodas do semi-eixo e o sensor.

Como há a possibilidade de movimentar o simulador transversalmente sobre a pista e ensaiar mais de uma trilha de roda optou-se pela instalação de um sensor com comprimento suficientemente extenso para que possibilitasse medições em toda a abrangência de ensaio do simulador.

Em função dos fatores mencionados acima foi escolhido um sensor piezoelétrico de 2.73m de comprimento (9”), classe I (WIM) conforme tabela de especificação apresentada a seguir. Por dificuldades de disponibilidade no fabricante, acabaram por serem instalados sensores com 3.50m, sem prejuízo do funcionamento do mesmo.

Para a implantação na pista experimental é necessário a instalação de duas linhas de sensores piezoelétricos, um sensor de temperatura e um equipamento para coleta e análise de dados. Na Figura 22 está apresentada uma representação esquemática da aplicação dos sensores na Pista Experimental onde é importante garantir o contato pleno do rodado do simulador com o sensor.

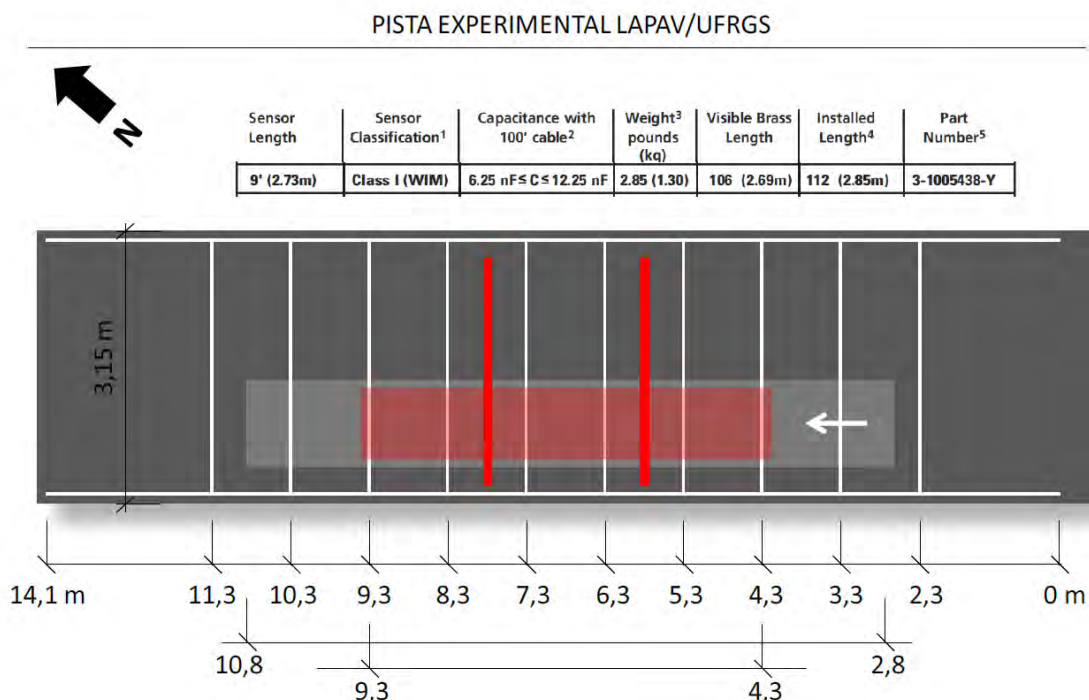


Figura 22 - Esquema de instalação dos sensores na pista experimental LAPAV/UFRGS



Sensor Length	Sensor Classification ¹	Capacitance with 100' cable ²	Weight ³ pounds (kg)	Visible Brass Length	Installed Length ⁴	Part Number ⁵
6' (1.82m)	Class II	4.00 nF ≤ C ≤ 10.00 nF	2.75 (1.25)	70 (1.78m)	76 (1.93m)	0-1005333-Y
8' (2.42m)	Class II	5.50 nF ≤ C ≤ 11.50 nF	2.80 (1.27)	94 (2.38m)	100 (2.54m)	1-1005333-Y
9' (2.73m)	Class II	6.25 nF ≤ C ≤ 12.25 nF	2.85 (1.30)	106 (2.69m)	112 (2.85m)	2-1005333-Y
10' (3.03m)	Class II	7.00 nF ≤ C ≤ 13.00 nF	2.90 (1.32)	118 (3.00m)	124 (3.15m)	3-1005333-Y
11' (3.33m)	Class II	7.75 nF ≤ C ≤ 13.75 nF	2.95 (1.34)	130 (3.30m)	136 (3.45m)	4-1005333-Y
12' (3.64m)	Class II	8.50 nF ≤ C ≤ 14.50 nF	3.00 (1.36)	139 (3.53m)	145 (3.68m)	5-1005333-Y
13' (3.94m)	Class II	9.25 nF ≤ C ≤ 15.25 nF	3.05 (1.39)	154 (3.91m)	160 (4.06m)	6-1005333-Y
6' (1.82m)	Class I (WIM)	4.00 nF ≤ C ≤ 10.00 nF	2.75 (1.25)	70 (1.78m)	76 (1.93m)	1-1005438-Y
8' (2.42m)	Class I (WIM)	5.50 nF ≤ C ≤ 11.50 nF	2.80 (1.27)	94 (2.38m)	100 (2.54m)	2-1005438-Y
9' (2.73m)	Class I (WIM)	6.25 nF ≤ C ≤ 12.25 nF	2.85 (1.30)	106 (2.69m)	112 (2.85m)	3-1005438-Y
10' (3.03m)	Class I (WIM)	7.00 nF ≤ C ≤ 13.00 nF	2.90 (1.32)	118 (3.00m)	124 (3.15m)	4-1005438-Y
11' (3.33m)	Class I (WIM)	7.75 nF ≤ C ≤ 13.75 nF	2.95 (1.34)	130 (3.30m)	136 (3.45m)	5-1005438-Y
12' (3.64m)	Class I (WIM)	8.50 nF ≤ C ≤ 14.50 nF	3.00 (1.36)	139 (3.53m)	145 (3.68m)	6-1005438-Y
13' (3.94m)	Class I (WIM)	9.25 nF ≤ C ≤ 15.25 nF	3.05 (1.39)	154 (3.91m)	160 (4.06m)	7-1005438-Y
2.0m (6'7)	Class II	4.94 nF ≤ C ≤ 10.94 nF	2.75 (1.25)	1.98 m (78)	2.14 m (84)	1-1005528-Z
2.5m (8'3)	Class II	6.17 nF ≤ C ≤ 12.17 nF	2.85 (1.30)	2.48 m (98)	2.64 m (104)	2-1005528-Z
3.0m (9'11)	Class II	7.40 nF ≤ C ≤ 13.40 nF	2.95 (1.35)	2.98 m (117)	3.14 m (123)	3-1005528-Z
3.5m (11'6)	Class II	8.63 nF ≤ C ≤ 14.63 nF	3.05 (1.40)	3.48 m (137)	3.64 m (143)	4-1005528-Z
4.0m (13'2)	Class II	9.87 nF ≤ C ≤ 15.87 nF	3.15 (1.45)	3.98 m (157)	4.14 m (163)	5-1005528-Z
4.5m (14'10)	Class II	11.09 nF ≤ C ≤ 17.09 nF	3.25 (1.50)	4.48 m (177)	4.64 m (183)	6-1005528-Z
5.0m (16'6)	Class II	12.32 nF ≤ C ≤ 18.32 nF	3.35 (1.55)	4.98 m (196)	5.14 m (202)	7-1005528-Z
5.5m (18'2)	Class II	13.55 nF ≤ C ≤ 19.55 nF	3.45 (1.60)	5.48 m (216)	5.64 m (222)	8-1005528-Z
2.0m (6'7)	Class I (WIM)	4.94 nF ≤ C ≤ 10.94 nF	2.75 (1.25)	1.98 m (78)	2.14 m (84)	1-1005527-Z
2.5m (8'3)	Class I (WIM)	6.17 nF ≤ C ≤ 12.17 nF	2.85 (1.30)	2.48 m (98)	2.64 m (104)	2-1005527-Z
3.0m (9'11)	Class I (WIM)	7.40 nF ≤ C ≤ 13.40 nF	2.95 (1.35)	2.98 m (117)	3.14 m (123)	3-1005527-Z
3.5m (11'6)	Class I (WIM)	8.63 nF ≤ C ≤ 14.63 nF	3.05 (1.40)	3.48 m (137)	3.64 m (143)	4-1005527-Z
4.0m (13'2)	Class I (WIM)	9.87 nF ≤ C ≤ 15.87 nF	3.15 (1.45)	3.98 m (157)	4.14 m (163)	5-1005527-Z
4.5m (14'10)	Class I (WIM)	11.09 nF ≤ C ≤ 17.09 nF	3.25 (1.50)	4.48 m (177)	4.64 m (183)	6-1005527-Z
5.0m (16'6)	Class I (WIM)	12.32 nF ≤ C ≤ 18.32 nF	3.35 (1.55)	4.98 m (196)	5.14 m (202)	7-1005527-Z
5.5m (18'2)	Class I (WIM)	13.55 nF ≤ C ≤ 19.55 nF	3.45 (1.60)	5.48 m (216)	5.64 m (222)	8-1005527-Z

1. Class II sensors have a uniformity of $\pm 20\%$ and are typically used for Classification purposes. Class I sensors have a uniformity of $\pm 7\%$ and are typically used for Weigh in Motion applications.
2. Additional cable has a capacitance of 27 pF/ft (89 pF/m) or 2.7 nF/100' (2.2 nF/25m). Provided with each sensor is a test certificate with the actual tested value for the sensor. Field tests should be within $\pm 20\%$ of these values, at room temperature (70F or 23C).
3. All sensors are packaged 2 per box. The box weighs 1.5 lbs (0.7 kg).
4. This length refers to the installed length of the sensor. This is the minimum lane width for the installed sensor.
5. The suffix refers to the cable length. Cable lengths for -Y are as follows: -1 @ 100', -2 @ 150', -3 @ 200', -4 @ 250', -5 @ 300'. Cable lengths for the -Z are as follows: -1 @ 35m, -2 @ 50m, -3 @ 75M, and -4 @ 100m.

5.3.2 Recomendações de instalação

Apresenta-se neste item resumidamente algumas das recomendações de instalação dos sensores determinadas pelo fabricante, recomenda-se a consulta do manual completo em anexo com todas as recomendações prescritas detalhadamente.

Inicialmente é necessário realizar uma demarcação cuidadosa do layout da instalação dos sensores garantindo que os mesmos sejam colocados exatamente perpendiculares ao fluxo de tráfego. É importante verificar se o cabo apresenta extensão suficiente para alcançar o abrigo com o sistema de controle, não é recomendado fazer emendas nos mesmos. Uma representação típica do layout de instalação de sensores WIM de 11' (3,5m) é apresentada na Figura 23 abaixo.

É importante atentar que para a implantação do sistema WIM, sua validação e calibração através da utilização do Simulador de Tráfego, há a necessidade da realização de algumas considerações diferenciadas, tanto na instalação quanto na programação do hardware do equipamento. Esta diferenciação está descrita no item 5.3.3 Necessidades especiais para instalação na pista experimental.

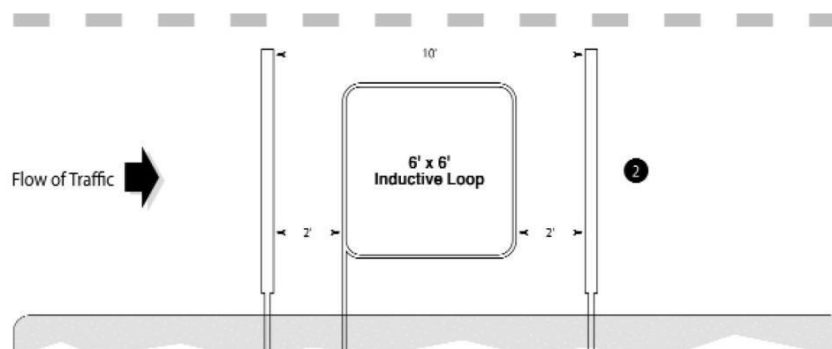


Figura 23 - Layout típico de instalação de sensores WIM

O corte executado no pavimento para a instalação dos sensores deve apresentar uma largura de $20\text{mm} \pm 2\text{ mm}$ ($3/4''$) com uma profundidade mínima de 25mm ($1''$). Em ambas as laterais do sensor ficará uma “folga” de aproximadamente 6mm , ou seja, 3mm em cada lado ($1/8''$) (Figura 24).

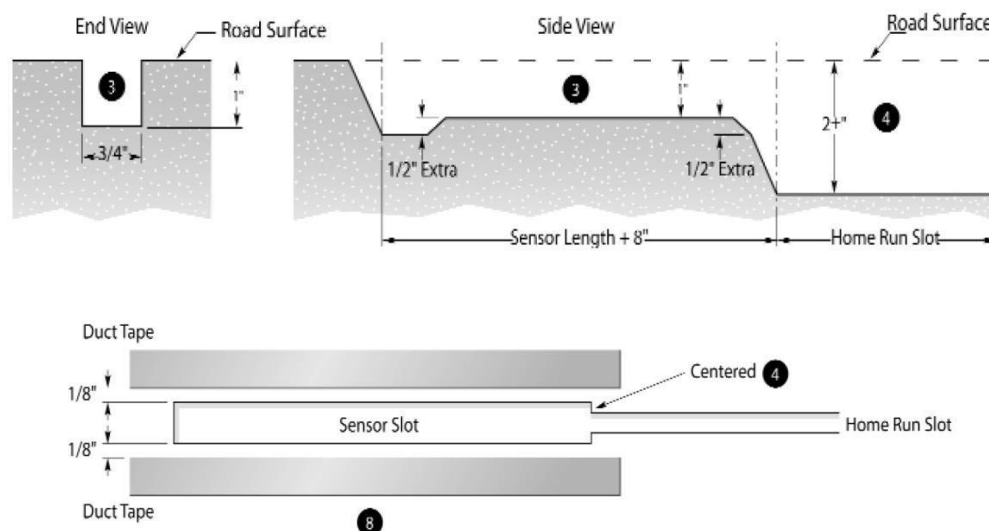


Figura 24 - Representação esquemática dos cortes para instalação dos sensores

Uma fita adesiva deve ser colocada ao longo do comprimento de ambos os lados do corte. Deve-se tomar cuidado para deixar o sensor perfeitamente centralizado dentro do corte, isto é facilmente realizado com o auxílio de ganchos de fixação/centralização conforme apresentado na Figura 25.

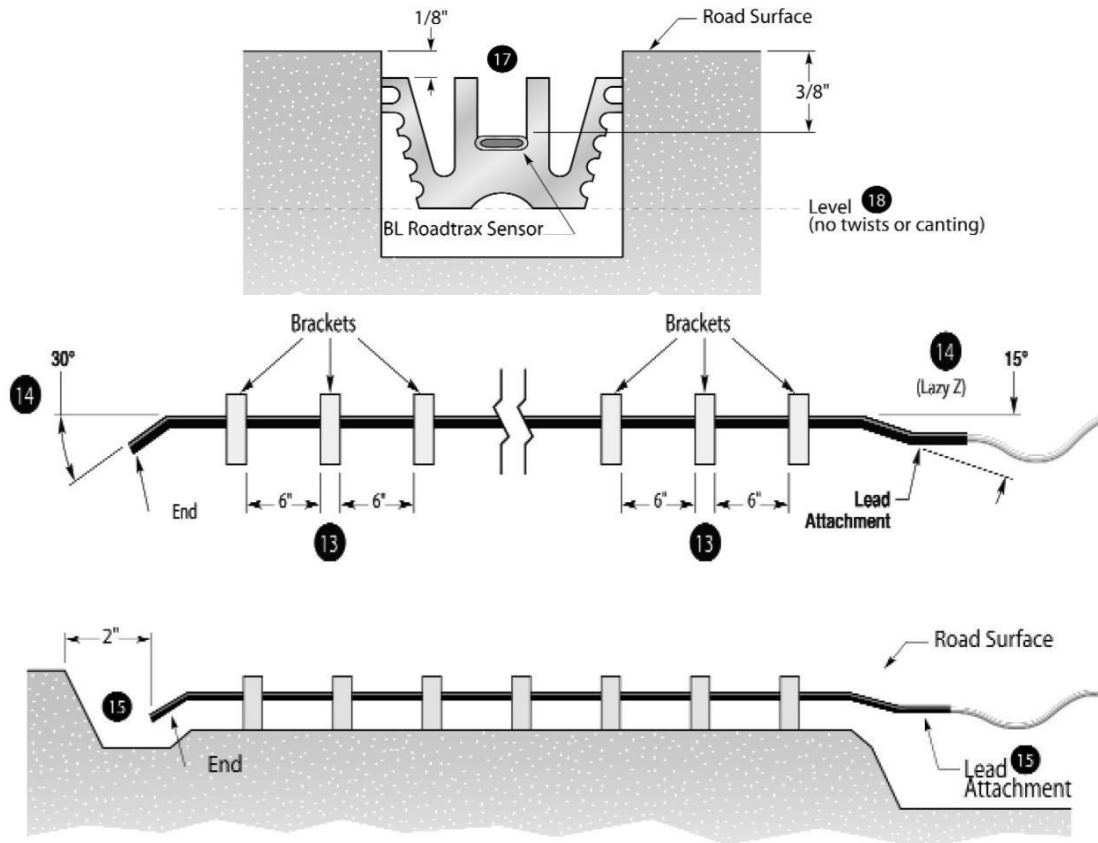


Figura 25 - Sistema de centralização, alinhamento e fixação dos sensores dentro do corte de instalação através de ganchos específicos

Antes da instalação dos sensores é necessário limpar e secar os cortes no pavimento. Pode-se lavar, varrer e posteriormente secar com ar comprimido os cortes, todos devem estar muito bem limpos em ambos os lados e as superfícies devem estar completamente secas.

Os sensores devem ser inspecionados visualmente para garantir que estão retos, sem torções ou quebras, é recomendada a utilização de luvas de látex para manuseio dos sensores. Se necessário realizar limpeza do sensor conforme descrições no manual em anexo.

Os suportes de instalação devem ser fixados a cada 150mm (6") ao longo do comprimento do sensor, conforme demonstrado na Figura 25. A extremidade do sensor deve apresentar uma dobra para baixo num ângulo de 30°. Na outra extremidade, a dobra para baixo é realizada em um ângulo de 15° e depois 15° para trás até o nível (formando um Z "Lazy Z") conforme Figura 25.

Tanto as extremidades quanto o sensor em seu comprimento não devem tocar o fundo ou as laterais do corte. É necessário inspecionar visualmente o comprimento do sensor para

garantir que o mesmo encontra-se em profundidade uniforme e em nível ao longo de seu comprimento.

Após fixação e alinhamento dos sensores, faz-se a selagem do corte com aplicação de uma resina (tipo epóxi) “grout” que fixa os sensores dentro dos cortes no pavimento. Os componentes da resina são misturados momentos antes da aplicação. Deve-se tomar cuidado para evitar a formação de bolsões de ar durante a aplicação.

Usando uma espátula ou colher de pedreiro, espalha-se a argamassa ao longo do comprimento do corte conforme mostrado na Figura 26. A quantidade de resina deve ser sobrepor ligeiramente a área demarcada pela fita adesiva uma vez que irá diminuir enquanto cura.

Após a cura do grout, usa-se uma rebarbadora ou uma lixadeira para deixar nivelada a resina com a superfície, pode-se deixar ainda uma leve curvatura na superfície para evitar o acúmulo de água, conforme demonstrado na Figura 26.

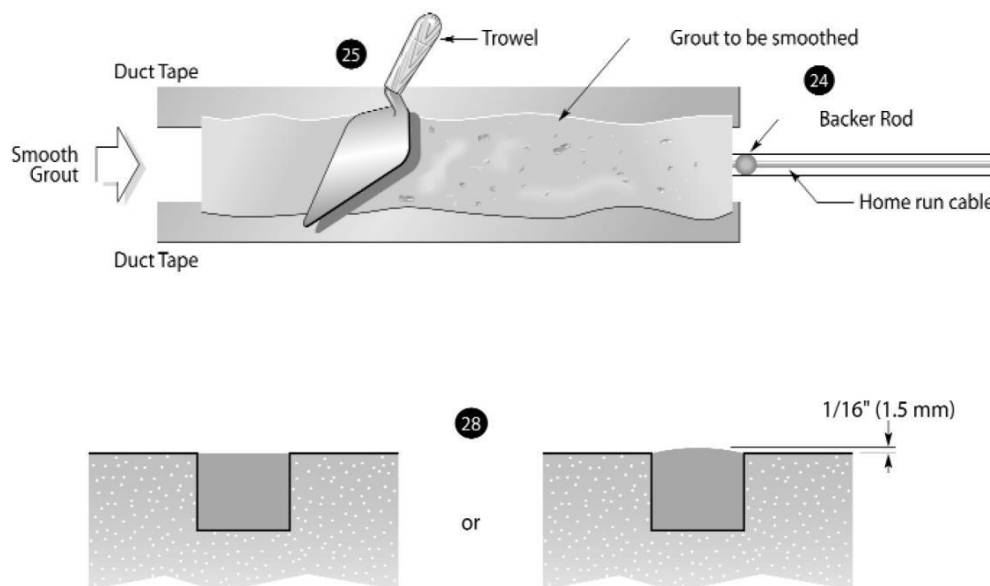


Figura 26 - Selagem dos cortes após fixação dos sensores

As instruções completas de instalação, conforme descrito anteriormente no início deste item encontram-se em anexo. Nos item a seguir serão apresentados detalhadamente todos os procedimentos adotados durante a instalação dos sensores na pista experimental do LAPAV/UFRGS.



5.3.3 Necessidades especiais para instalação na pista experimental LAPAV/UFRGS

Para a implantação do sistema WIM, sua validação e calibração através da utilização do Simulador de Tráfego, há a necessidade da realização de uma programação diferenciada do hardware do equipamento.

Ocorre que o simulador de tráfego simula apenas um semi-eixo a cada passagem, o que não seria suficiente para gatilho do equipamento. A passagem de apenas um eixo não é configuração convencional para um veículo, logo ele não acionaria uma leitura. Para tanto é necessário utilizar uma lógica diferenciada do sistema de forma que permita que cada passagem do simulador na pista de tráfego seja reconhecida.

Para atender esta necessidade, foi desenvolvido pela equipe da TRACEVIA/TDC um firmware específico que leva em conta as características diferenciadas do sistema de aplicação de carga através do semi-eixo do simulador de tráfego.

Através desta adequação têm-se condições adequadas de leitura e interpretação dos dados adquiridos durante esta importante parte da pesquisa, a qual tem por objetivo o correto entendimento de funcionamento do sistema de pesagem, suas especificidades e limitações para assim implantar de forma mais “segura” posteriormente o na rodovia. Outros dois pontos de grande importantes a serem observados e relatados referentes à instalação do sistema na pista experimental dizem respeito à necessidade de instalação do Loop Magnético e ao distanciamento entre os dois sensores piezoelétricos.

Usualmente na instalação de um sistema WIM utiliza-se um princípio que consiste na seguinte configuração: Piezo-Loop-Piezo. Neste caso o Loop serve como gatilho para o acionamento do sistema de registro de leitura dos sensores (instalados aos pares para aquisição de uma média de leitura de uma passagem sobre o sistema e cálculo da velocidade do veículo em caso de múltiplos sensores).

No caso em questão, não há a necessidade de instalação do Loop magnético, pois com a configuração diferenciada do software para a passagem do semi-eixo do simulador, a própria passagem e detecção de pressão gerada pela passagem do rodado já caracteriza um gatilho para o registro de uma passagem de carregamento.

Adicionalmente, em função da não necessidade de instalação de um Loop magnético e principalmente em decorrência da baixa velocidade de passagem do Simulador, com uma velocidade média de 5km/h, definiu-se juntamente com os consultores da TRACEVIA que não haveria a necessidade de um distanciamento entre as duas linhas de sensores da mesma magnitude estabelecida pelo fabricante ($\pm 3,00\text{m}$).

Com as considerações acima, chegou-se a definição de um distanciamento menor entre os sensores piezoelétricos. A distância adotada será de 2,00m. Um fato importante observado para a definição do local de instalação dos sensores na pista experimental diz respeito aos trechos de aceleração e desaceleração do semi-eixo de aplicação de cargas. Estes trechos estão apresentados na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, portanto, evitou-se em função da variação de carregamento e velocidade estes trechos, sendo definidos locais sem degradação (trincamentos) e sem influências dos fatores acima denominados para a instalação dos sensores piezoelétricos.



5.4 ETAPAS DE INSTALAÇÃO - PISTA EXPERIMENTAL LAPAV/UFRGS

Definiu-se em reunião com a equipe de engenharia da CONCEPA e Pesquisadores de UFRGS que a infraestrutura e apoio necessário para instalação, assim como a equipe de campo designada para tal será a equipe da própria concessionária, equipe esta que já dispõe de equipamento apropriado e alguma experiência na instalação de equipamentos similares.

A instalação foi acompanhada, além dos representantes da UFRGS/LAPAV, equipe da Prime Engenharia e CONCEPA, por representantes da própria empresa fabricante do equipamento (TDC) ou sua representante no Brasil (TRACEVIA) para garantir a correta instalação dos sensores no pavimento.

Nos itens a seguir são descritas detalhadamente as etapas seguidas durante o processo, primeiramente de instalação dos sensores, e posteriormente de calibração do sistema WIM na Pista Experimental LAPAV/UFRGS.

5.4.1 Detalhamento da Instalação dos sensores WIM

O presente item apresenta, de forma detalhada, a descrição da metodologia e os procedimentos adotados para execução da instalação do sistema WIM na Pista Experimental. É apresentado um detalhado registro fotográfico das atividades desenvolvidas em campo e descrições das ferramentas utilizadas no trabalho.

Resumidamente, no processo de instalação é necessária a execução de cortes superficiais no revestimento nas dimensões compatíveis ao tipo de sensor, de acordo com a especificação do produto.

A sequência dos procedimentos de instalação seguida foi àquela definida e apresentada no manual desenvolvido pelo fabricante (em anexo). O conjunto de procedimentos segue o padrão de montagem pré-estabelecido e, conseqüentemente, os respectivos ajustes quanto a posição espacial horizontal e posição vertical, sendo, via de regra, a profundidade o critério de controle mais rigoroso entre as atividades. Por fim aplica-se a resina do tipo epóxi com rigidez compatível ao funcionamento do sensor.

5.4.2 Regulagem equipamento (serra) e cortes teste

A fim de tentar prever algumas dificuldades que eventualmente pudessem surgir durante o processo de instalação dos sensores no pavimento experimental, principalmente no que diz respeito aos cortes a serem executados no pavimento, foram realizados alguns “cortes teste” em um pavimento próximo ao local de instalação definitiva dos sensores.

Pelo fato de o pavimento experimental estar sendo objeto de estudo de outra pesquisa, erros no corte não são tolerados, em função disso decidiu-se realizar esta “simulação” do processo de instalação com “cortes teste” em um pavimento semelhante na Área de Pesquisa e Testes em Pavimentos. Esta etapa serviu para “treinamento” do operador da

serra de corte e antecipação de dificuldades conforme mencionado anteriormente (Figura 27).



Figura 27 – Realização de “cortes testes” em pavimento na área de testes

A preparação do pavimento antes da instalação definitiva dos sensores consiste na limpeza superficial do pavimento e demarcação dos locais de cortes (Figura 28).



Figura 28 - Preparação do pavimento para instalação definitiva

A seguir serão descritas todas as atividades de instalação do sistema WIM, onde foram instaladas duas linhas de sensores piezoelétricos de 3,50m de comprimento (11'6), classe I (WIM), o espaçamento dos sensores adotado foi de 2,00m definido conforme descrito anteriormente.

5.4.3 Etapas de instalação dos sensores na pista experimental

Limpeza – A limpeza pista experimental (Figura 29) consistiu na retirada de todo e qualquer tipo de material que oferecesse dificuldades na realização das etapas de instalação dos sensores, principalmente, no caso em questão, a demarcação dos locais de realização dos cortes no pavimento.



Figura 29 – Pavimento limpo para demarcação dos locais de corte

Marcação e pintura – a marcação foi realizada através da locação espacial de pontos notáveis realizados com o auxílio de trena e régua metálica ao longo da seção transversal do pavimento. Como referência inicial, tomou-se início seção de número 4.

A marcação para instalação dos sensores foi realizada entre as seções de nº 4 e 5 e entre as seções de nº 6 e 7, conforme demonstrado na Figura 30. Posteriormente realizou-se a pintura com tinta Spray, ligando os pontos notáveis por linhas esticadas, ficando as marcações dos cortes pintadas no pavimento, demarcando assim o local preciso de corte para instalação dos sensores (Figura 30).

A marcação dos locais de corte concluída com a locação dos sensores piezoelétricos juntamente com o sensor de temperatura é apresentada na Figura 31.

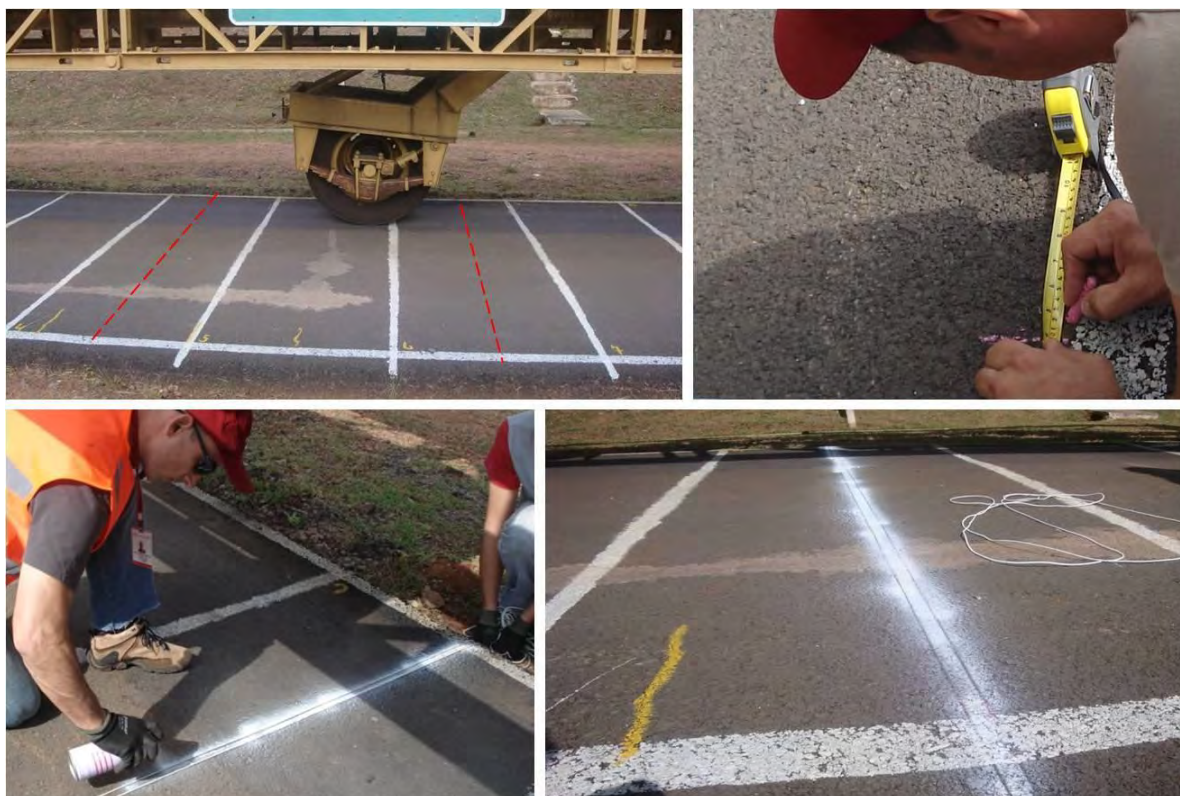


Figura 30 - Marcação e pintura para instalação dos sensores

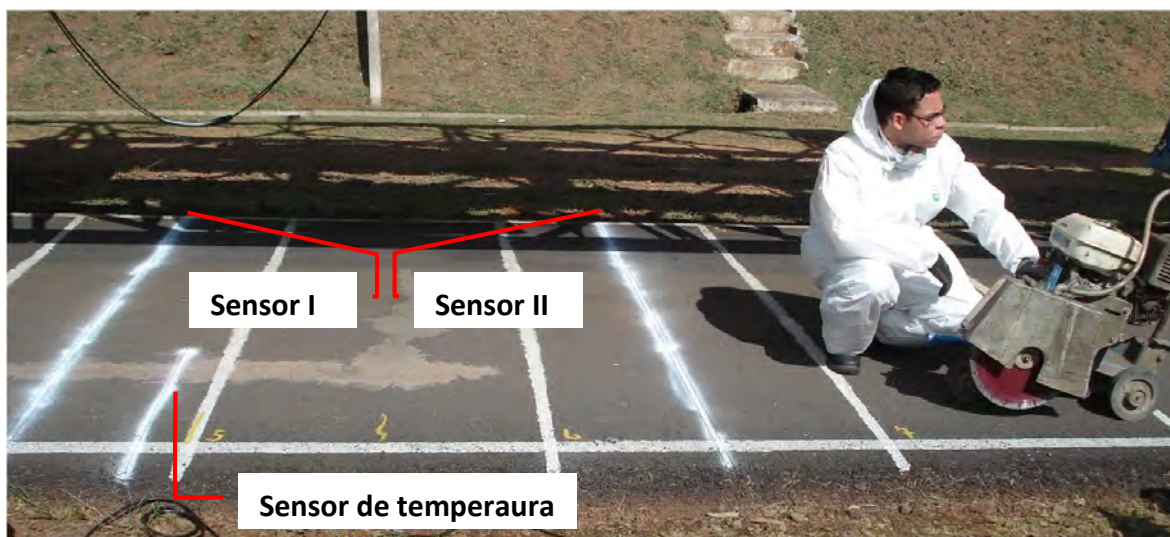


Figura 31 - Pintura concluída aguardando início dos cortes

Corte do pavimento – o corte do pavimento foi realizado por um equipamento portátil dotado de uma serra circular diamantada, própria para cortes em estruturas maciças, utilizada correntemente em cortes de pavimentos asfálticos (Figura 32). A largura necessária para instalação (20mm) exige a execução de dois cortes paralelos para obter a espessura de corte especificada para o tipo de sensor a ser instalado. Foram realizados dois cortes paralelos e posteriormente realizada a retirada de material do revestimento asfálticos entre os dois cortes executados, conforme será explicado no item a seguir.

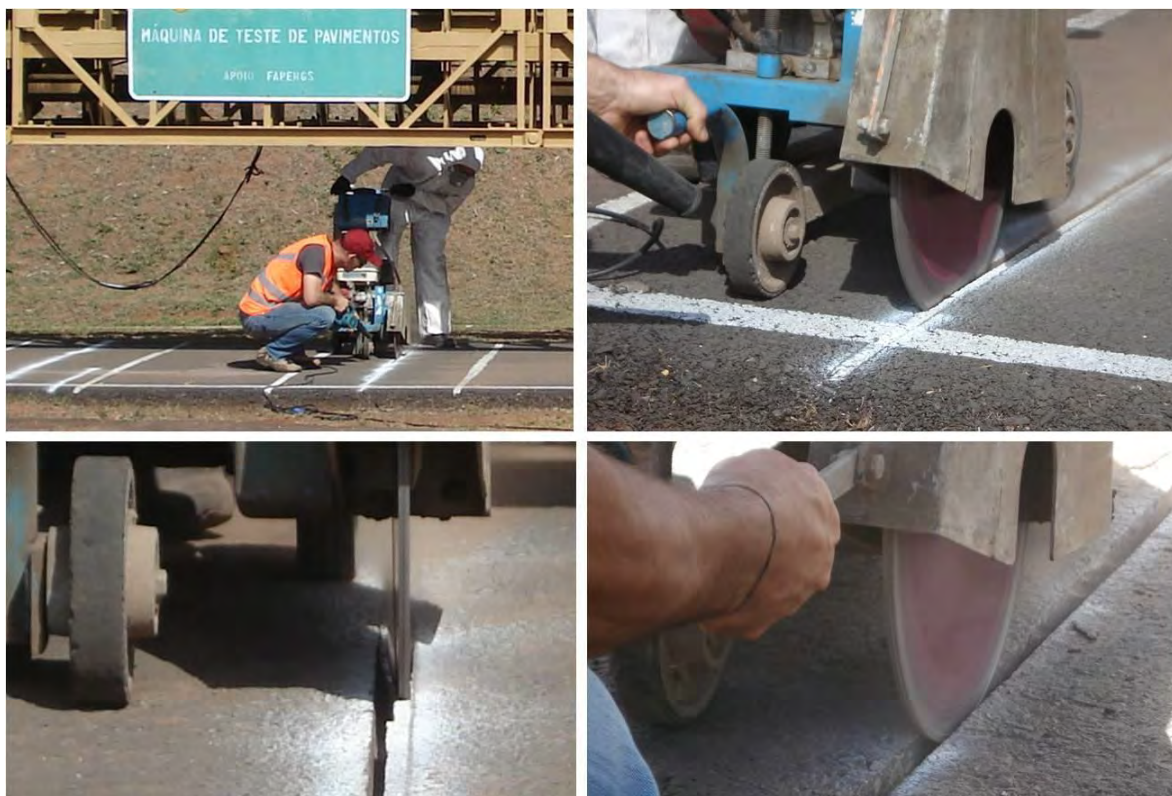


Figura 32 - Realização dos cortes no pavimento

Limpeza do Corte – após a realização dos cortes, os mesmos foram submetidos a um rigoroso procedimento de limpeza, conforme demonstrado na Figura 33.



Figura 33 - Limpeza dos cortes e conferência de dimensões



Após a execução dos cortes conforme descrito anteriormente fez-se a retirada do revestimento existente entre os dois cortes com o auxílio de martelo e talhadeira. Para a verificação da conformidade das dimensões dos cortes especificados realizou-se a conferência através de um gabarito metálico produzido especificamente para esta finalidade.

Conforme recomendações do fabricante as dimensões para instalação são as seguintes: 3/4"(20mm) com tolerância de ($\pm 1/16"$ ou $\pm 2\text{mm}$) com profundidade mínima de 1" (25mm), dimensões estas reproduzidas no gabarito de conferência.

Além da conferência das dimensões dos cortes com o gabarito, utilizou-se ainda os espaçadores (20mm e 25mm), conforme apresentado na Figura 34, para garantir a correta instalação (travamento) dos sensores dentro dos cortes realizados em caso de pequenos desvios ou imperfeições que eventualmente ocorreram durante a execução dos cortes no pavimento.

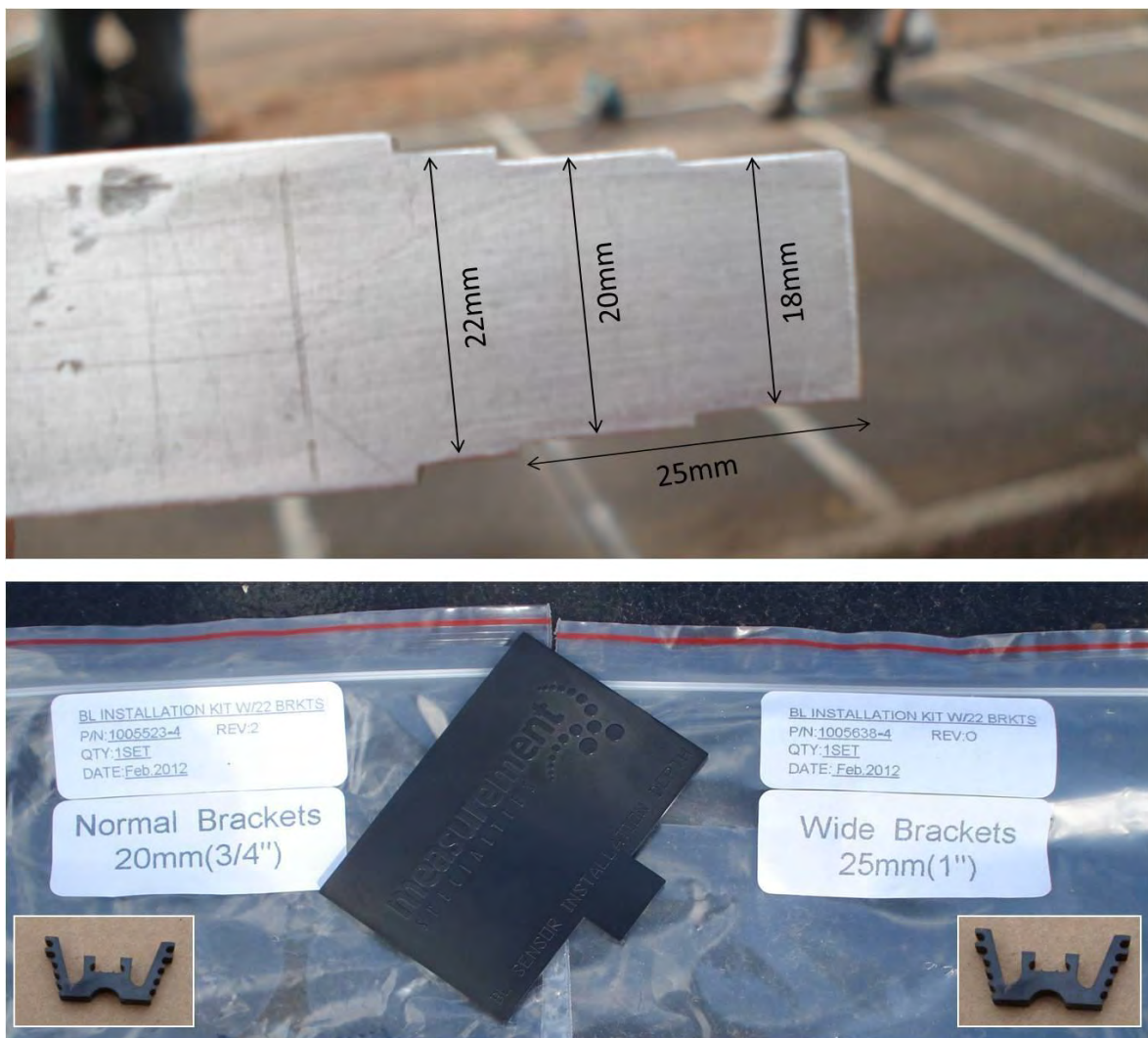


Figura 34 – Gabarito para conferência das medidas dos cortes executados e espaçadores com dois tamanhos distintos (20mm e 25mm)



Preparação dos sensores – cada sensor vem em embalagens individuais (Figura 35) e são preparados momentos antes da instalação, são fornecidos os elementos auxiliares como espaçadores, gabaritos, cabos, entre outros.

A preparação dos sensores (Figura 36) consiste na inspeção visual dos sensores, os mesmos são verificados se estão retos, sem torções ou quebras, é recomendada a utilização de luvas de látex para manuseio dos sensores.



Figura 35 – Embalagem com sensores piezoelétricos



Figura 36 – Preparação dos sensores para instalação

Após a inspeção visual dos sensores foram fixados os espaçadores conforme recomendação do fabricante (Figura 36) e realizadas as dobras nas extremidades conforme manual de instalação.

Instalação dos sensores – após preparação dos sensores estes foram posicionados no interior das canaletas. O sensor recebe ajustes nos respectivos espaçadores para que o mesmo esteja corretamente alinhado e na profundidade certa.

Para garantir a profundidade correta do sensor (3/8" - 9mm) é utilizado um gabarito especificamente desenvolvido para tal e faz parte dos componentes auxiliares de instalação fornecidos pelo fabricante. A Figura 37 e a Figura 38 apresentam as etapas do processo de instalação dos sensores.

Após a acomodação do sensor no interior do corte realizado no pavimento (Figura 38), o mesmo foi posicionado na profundidade correta com o auxílio do gabarito que garante a sua profundidade adequada. Após a finalização do posicionamento, realizaram-se os preparativos para aplicação do “grout” - resina que permite o fechamento dos cortes e finalização da instalação.

Conforme recomendação de instalação realizou-se a colocação de fita adesiva na borda lateral ao longo do corte para garantir o acabamento final da resina de selagem.



Figura 37 - Processo de instalação dos sensores



Figura 38 – Processo de instalação dos sensores

Preparação e aplicação do “grout” e selagem– o “grout” é uma resina (tipo epóxi) que fixa os sensores dentro das aberturas cortadas. Os componentes da resina são misturados momentos antes da aplicação com o sensor. Antes da preparação do grout foi realizada uma limpeza final para garantir que nenhuma impureza ficasse dentro dos cortes.



Figura 39 – Limpeza final dos cortes e revestimento



Figura 40 – Preparação do grout para selagem dos cortes



Figura 41 - Selagem dos cortes após instalação dos sensores



Na selagem, etapa final do processo de instalação, quando os sensores alinhados dentro das canaletas de corte recebem a massa epóxi (Figura 40 e Figura 41), deve-se tomar cuidado para evitar a formação de bolsões de ar, pois os mesmos podem comprometer o funcionamento futuro do sensor. A resina deve ser espalhada de forma homogênea com o auxílio de uma espátula ou colher de pedreiro, preferencialmente em mais de uma camada com cuidado em função da rápida secagem depois de preparada.

5.5 CALIBRAÇÃO DO SISTEMA

Para a verificação e entendimento do funcionamento do sistema de coleta e armazenamento dos dados realizados pelo sistema WIM sua posterior interpretação desenvolveu-se esta etapa, onde se fará uso de um sistema de aplicação de cargas e condições de contorno através de um sistema conhecido (Simulador de Tráfego) e de fácil e variação (cargas).

A fim de garantir a precisão e conformidade dos ensaios realizados, será realizada primeiramente a calibração da unidade hidráulica do simulador de tráfego. Com a unidade hidráulica de aplicação de carga devidamente calibrada serão aplicados distintos carregamentos sobre o pavimento (carga conhecida) e verificados/comparados os resultados lidos pelos sensores piezoelétricos do sistema WIM. Os procedimentos a serem realizados nesta etapa são descritos nos itens a seguir.

5.5.1 Calibração do sistema de aplicação de cargas do Simulador de Tráfego

O sistema de aplicação de carga empregado pelo simulador de tráfego consiste na aplicação de carga através de uma unidade hidráulica comandada eletronicamente e de um cilindro hidráulico.

A carga é aplicada sempre com deslocamento em um único sentido, sendo o retorno realizado com o rodado em suspensão, isso é realizado para que se consiga reproduzir as condições de tráfego reais em uma rodovia.

A transmissão da carga ao pavimento é feita através de um semi-eixo de rodado duplo, articulado e regulável que trafega a uma velocidade média de 5km/h. O rodado é ligado ao carro através de um garfo articulado. Na Figura 42 é apresentada uma imagem do sistema de aplicação da carga ao pavimento.

Através deste sistema podem ser aplicadas no pavimento cargas reguláveis de até 65 kN (correspondentes a cargas no eixo (ESRD) de 0 a 130 kN). Antes de iniciar a solicitação da pista para verificar o funcionamento dos sensores de Pesagem em Movimento (WIM) será realizada a calibração da unidade hidráulica do simulador de tráfego. Neste processo serão utilizadas uma unidade de leitura digital e uma célula de carga, o processo de calibração está representado esquematicamente na Figura 43.



Figura 42 - Sistema de aplicação de carga

Inicialmente será realizada a calibração da célula de carga a ser utilizada na calibração da unidade hidráulica do simulador. O processo e os resultados desta calibração encontram-se descritos a seguir. A calibração da célula de carga foi realizada na prensa MTS.

A calibração da unidade hidráulica de aplicação de cargas do simulador de tráfego é realizada após deslocamento transversal do simulador, e realização de um corte no pavimento na trilha já ensaiada (abertura de uma cavidade para embutimento do sistema de calibração), pois não se tem distanciamento suficiente entre o pavimento e o rodado para instalar o sistema de calibração (placa - célula de carga - placa).

A Figura 43 apresenta imagens do processo de calibração realizado.



Figura 43 - Processo de calibração da unidade hidráulica do simulador de tráfego

O processo de calibração consiste na aplicação, pelo rodado, de ciclos de carga e descarga sobre a célula de carga que, por sua vez, está posicionada entre duas placas metálicas, sendo que a placa inferior encontra-se diretamente sobre a base do pavimento.

Este processo dá origem a uma curva de calibração, que relaciona a carga aplicada pelo semi-eixo ao pavimento com a pressão correspondente regulada na unidade hidráulica conforme apresentado na Figura 44.

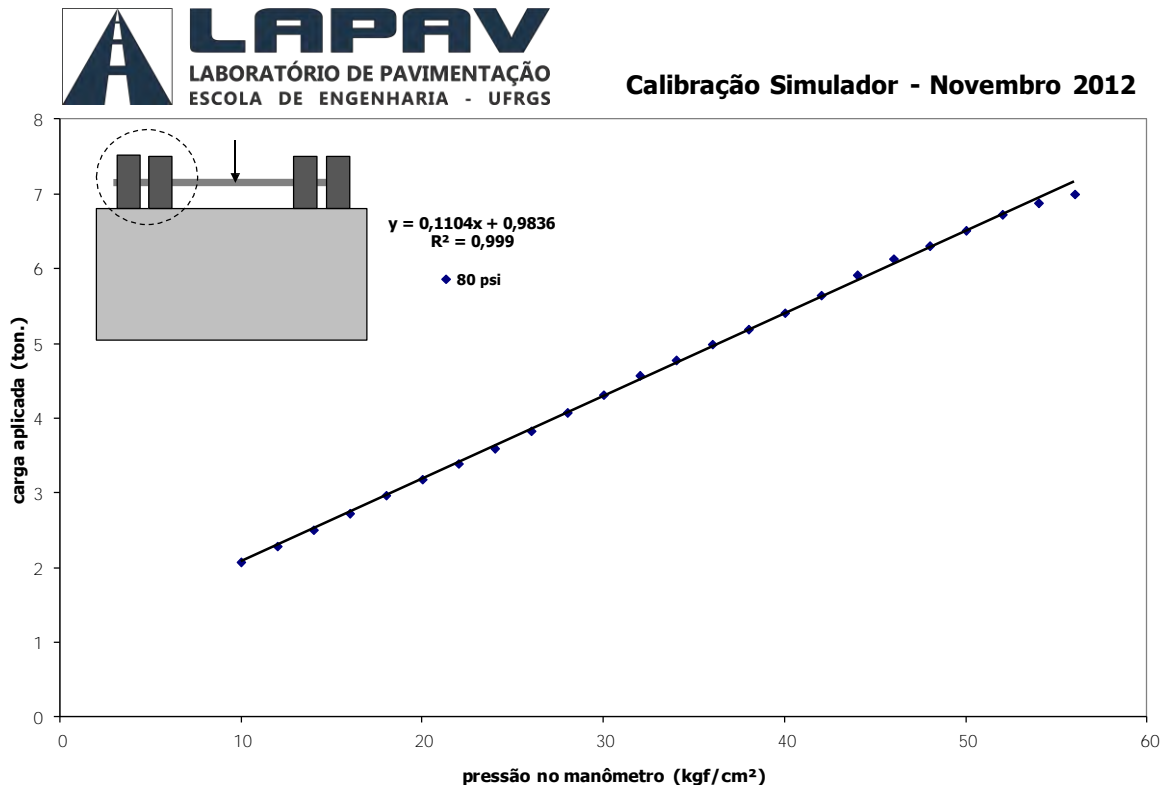


Figura 44 – Curva de calibração do simulador de tráfego

5.5.2 Definição dos níveis de carga a serem utilizados nos testes e fatores de influência nas leituras realizadas (temperatura)

Os níveis de cargas empregados nesta fase da pesquisa para análise experimental do sistema WIM instalado na pista experimental da área de Pesquisa e Testes em Pavimentos foram definidos a partir da análise de diversas Teses e Dissertações desenvolvidas durante um longo período de utilização do Simulador de Tráfego LAPAV/UFRGS que teve seu início no ano de 1996.

Além da definição dos níveis de carregamento “empregáveis” através do simulador de tráfego, foram também levados em consideração fatores como cargas admissíveis (especificadas pelos métodos de dimensionamento), e níveis de sobrecarga (problemas correntemente encontrados nos veículos que trafegam nas rodovias brasileiras).

Como esta fase tem por objetivo verificar o funcionamento do sistema WIM através da aplicação de carregamentos conhecidos, os mesmos serão divididos basicamente em três níveis, sendo eles denominados de Cargas Leves, Carga Padrão e Cargas com Excesso.

Um importante fato a ser lembrado referente à carga aplicada está no fato da mesma ser referente a um semi-eixo (ESRD/2), conforme demonstrado na Figura 45, portanto a carga apresentada corresponde à metade dos valores que normalmente podem ocorrer em um veículo do tipo ESRD.

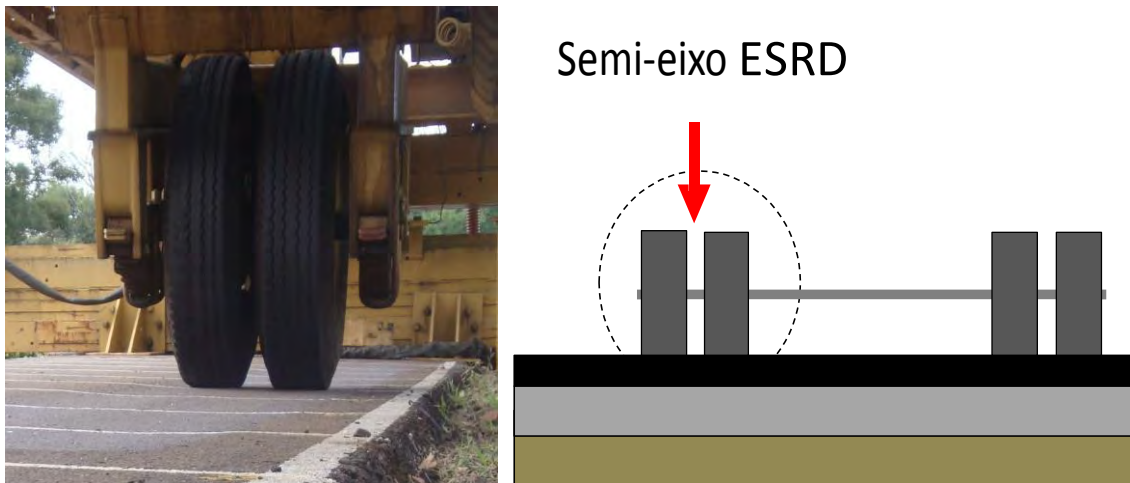


Figura 45 - Esquematização da aplicação de carga

Em função da série de fatores mencionados para a definição dos carregamentos empregados, os carregamentos a serem utilizados correspondem a aplicação de três carregamentos distintos, sendo eles: 24kN (2,4t), 38kN (3,8t) e 61kN (6,1t) no semi-eixo do simulador de tráfego.

Para a leitura da carga aplicada no pavimento, alguns fatores são de grande importância, principalmente a velocidade de aplicação do carregamento e a temperatura ambiente, sendo esta última a mais importante conforme pode ser visto nos resultados apresentados no próximo.

No caso do simulador de tráfego, o mesmo aplica carregamentos a uma velocidade constante e de aproximadamente 5km/h, não sendo possível a variação da mesma, fato este negativo, pois esta variável apresenta uma grande importância pelo fato do sistema em condições normais de aplicação (rodovias) realiza as leituras com altas velocidades.

O outro fator mencionado, a temperatura, tem influência significativa sobre os resultados lidos pelo sistema WIM.

Levando em consideração as grandes variações sazonais de temperatura no estado do Rio Grande do Sul, com verões quentes e invernos bastante rigorosos onde as temperaturas médias variam entre 15 e 18°C, com mínimas de até -10°C e máximas de 40°C, este fator é de grande importância nesta pesquisa.

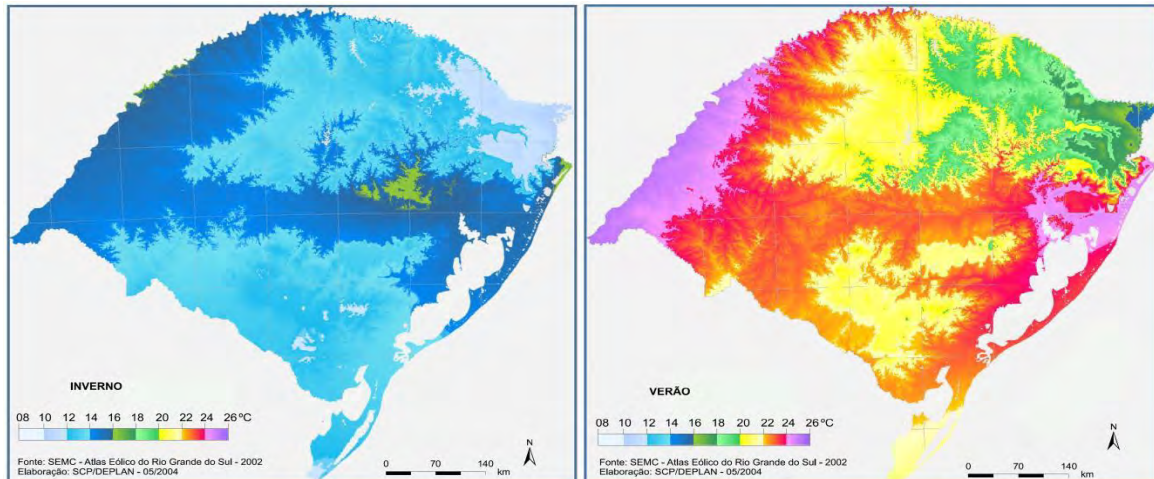


Figura 46 - Variação Sazonal da Temperatura Inverno - Verão

Como os gradientes de temperatura são bastante elevados entre os meses de verão e inverno, os testes de validação do sistema serão realizados em temperaturas distintas, procurando fazer leituras em temperaturas normais, próximas a 25°C e temperaturas mais baixas, quando o pavimento apresenta-se mais “rígido” e em temperaturas mais elevadas, onde o pavimento apresenta-se mais “flexível”.

O próprio sistema já realiza correções das medidas lidas (cargas) em função das temperaturas através de modelos definidos para tal.

Os testes aqui realizados tem simplesmente o objetivo de verificar o comportamento frente a variações de temperatura durante os períodos de testes e validação. Dessa forma poderá se entender melhor a forma com que o equipamento reage e se comporta frente a variações de temperatura, desde temperaturas baixas, até temperaturas mais elevadas. Valer-se-á de diferentes horas no dia e dias da semana para a máxima variação de temperaturas disponível.

- **Realização dos Testes de Validação**

Os testes de validação do sistema ocorrerão da seguinte forma:

Será realizada uma leitura da carga aplicada pelo semi-eixo através de uma célula de carga, devidamente calibrada e instalada em uma trilha de roda do pavimento experimental (conforme método seguido no processo de calibração da unidade hidráulica), após leitura desta carga conhecida será realizado um deslocamento transversal do simulador para outra trilha de roda onde serão realizadas diversas passagens do semi-eixo do simulador para aquisição dos valores de carregamento através dos sensores piezoelétricos do sistema WIM instalados.

Este processo será seguido diversas vezes, com mudança de carga aplicada conforme cargas especificadas anteriormente. Com este processo será realizado uma análise comparativa dos valores reais aplicados e os lidos pelo sistema WIM.

O número de leituras necessárias para os testes a ser realizados, com variação de carga e temperatura será discutido no próximo item que trata dos limites de aceitação e confiabilidade do sistema.



5.5.3 Limites de aceitação e confiabilidade do sistema WIM

O sistema a ser instalado, tanto na pista experimental do LAPAV/UFRGS quanto na rodovia BR-290/RS é classificado como sendo do Tipo I de acordo com a normatização ASTM E1318-02. Segundo descrição da norma os sistemas do Tipo I apresentam as seguintes características:

Tipo I: os sistemas instalados em rodovias de um ou mais pistas tem finalidade de contagem e classificação de veículos. Armazena as seguintes informações: carga por roda, carga por eixo, carga por grupo de eixo, peso bruto total, velocidade, espaçamento entre eixos, classe do veículo, identificação do posto, pista sentido e direção, data e hora, número sequencial de registro, distância entre eixos (+distantes), ESAL, código da infração;

Na Tabela 8 a seguir são apresentados os requisitos de desempenho funcional dos sistemas WIM conforme definidos pela ASTM (ASTM E1318-02, 2002).

A acurácia dos sistemas WIM é definida em função de quatro principais fatores, sendo eles: dinâmica do veículo; integridade, composição e projeto do pavimento; variância inerente no sistema WIM e calibração.

A Tabela 9 fornece alguns valores típicos para a acurácia para sistemas WIM. Como pode ser observado, os sistemas Piezoelétricos, dentre os apresentados, possuem uma maior acurácia dentro do intervalo de confiança apresentado.

Tabela 8 – Requisitos de desempenho de sistemas WIM (ASTM E1318-02, 2002)

Função	Tolerância (95% de probabilidade)				
	Tipo I	Tipo II	Tipo III	Tipo IV	
				Kg	±Kg
Carga por roda	± 25%	-	± 20%	2300	± 100
Carga por eixo	± 20%	± 30%	± 15%	5400	± 200
Carga por grupo de eixos	± 15%	± 20%	± 10%	11300	± 500
Peso bruto	± 10%	± 15%	± 6%	27000	± 1100
Velocidade	± 2 km/h				
Espaçamento entre eixos	± 0,15 m				

Tabela 9 – Valores típicos de acurácia (intervalo de confiança $\pm 1\sigma$)



Tecnologia de Pesagem em Movimento	Acurácia na medida de carga por grupo de eixos	Acurácia na medida do peso bruto total
Cabo Piezelétrico	12%	10%
Sensor de Quartzo	10%	8%
“Bending plate”	3%	2%
Célula de carga	2%	1%

Conhecendo estes limites de aceitabilidade do próprio sistema de medição, será realizada ainda uma análise para verificação através de modelos estatísticos qual a necessidade de testes necessários (medidas através da passagem do simulador de tráfego) para que se possuam dados em um intervalo de precisão admissível, com um bom nível de confiança.

5.6 PRINCIPAIS RESULTADOS OBTIDOS NA IMPLANTAÇÃO WIM LAPAV/UFRGS

Realizou-se com sucesso a instalação dos sensores piezoelétricos na pista experimental LAPAV/UFRGS conforme descrito anteriormente, esta etapa é importante para o estudo do equipamento tanto nos aspectos de processo de implantação, prevendo desta forma dificuldades que poderão surgir posteriormente na implantação na rodovia, quanto nos aspectos técnicos operacionais do sistema.

A instalação na Pista Experimental permite que o sistema seja estudado para favorecer uma implantação acurada no que se refere à sua instalação física para melhor funcionamento, e também a calibração do sistema através do uso de um Simulador de Tráfego que aplica cargas em movimentos para ajuste dos sensores e hardware de aquisição. Esta etapa da pesquisa será importante para o estabelecimento de um protocolo de coleta de dados que irá garantir a usabilidade dos resultados coletados na etapa seguinte na rodovia.

A instalação dos sensores foi realizada sem grandes dificuldades em função do excelente acompanhamento prestado, tanto por parte da equipe da TRACEVIA, representante da empresa fornecedora dos sensores para a presente pesquisa, quanto da equipe da concessionária CONCEPA que foi responsável pelo processo de instalação dos sensores no pavimento experimental.

Concluída a etapa de instalação dos sensores, iniciaram-se os testes de validação e verificação do comportamento do equipamento frente às solicitações realizadas na área de testes da UFRGS. Em função do surgimento de algumas necessidades especiais em relação ao software de aquisição e interpretação dos dados gerados a partir da pista solicitada pelo simulador de tráfego que possui uma configuração diferenciada das interpretadas pelo sistema convencional, houve a necessidade de desenvolvimento de um software específico para o funcionamento do sistema instalado na pista experimental.

Esta etapa de desenvolvimento e validação do software por parte da empresa fabricante dos sensores demandou um tempo considerável, em função deste fato não foi possível dentro dos limites anteriormente estabelecidos no cronograma inicial.

Em função da espera pela conclusão da adaptação do sistema, garantindo assim a sua aplicabilidade nos moldes propostos por esta pesquisa, foram adiantadas etapas posteriores da pesquisa, como por exemplo, a definição do local de instalação dos sensores em sua fase funcional, na BR-290/RS para atingir o objetivo principal da pesquisa, ou seja, a definição do espectro de cargas da rodovia.

Posteriormente, após a conclusão da etapa de desenvolvimento e aprimoramento do software, iniciaram-se os testes na área de testes em pavimentos, sendo os resultados a seguir apresentados.

5.7 CALIBRAÇÃO SISTEMA WIM – ADEQUAÇÃO DO SOFTWARE

Todo processo de calibração dos sensores foi realizado com acompanhamento das empresas fabricante e fornecedora do equipamento (Figura 47), debruçando uma grande demanda em função da peculiaridade do experimento, ou seja, a pesagem de um semi-eixo do simulador de tráfego atuante sobre a pista de testes.



Figura 47 - Processo de calibração do sistema na pista de testes LAPAV/UFRGS

Nas telas abaixo (Figura 48) são apresentadas algumas configurações empregadas para a realização das medições de carga no simulador de tráfego.

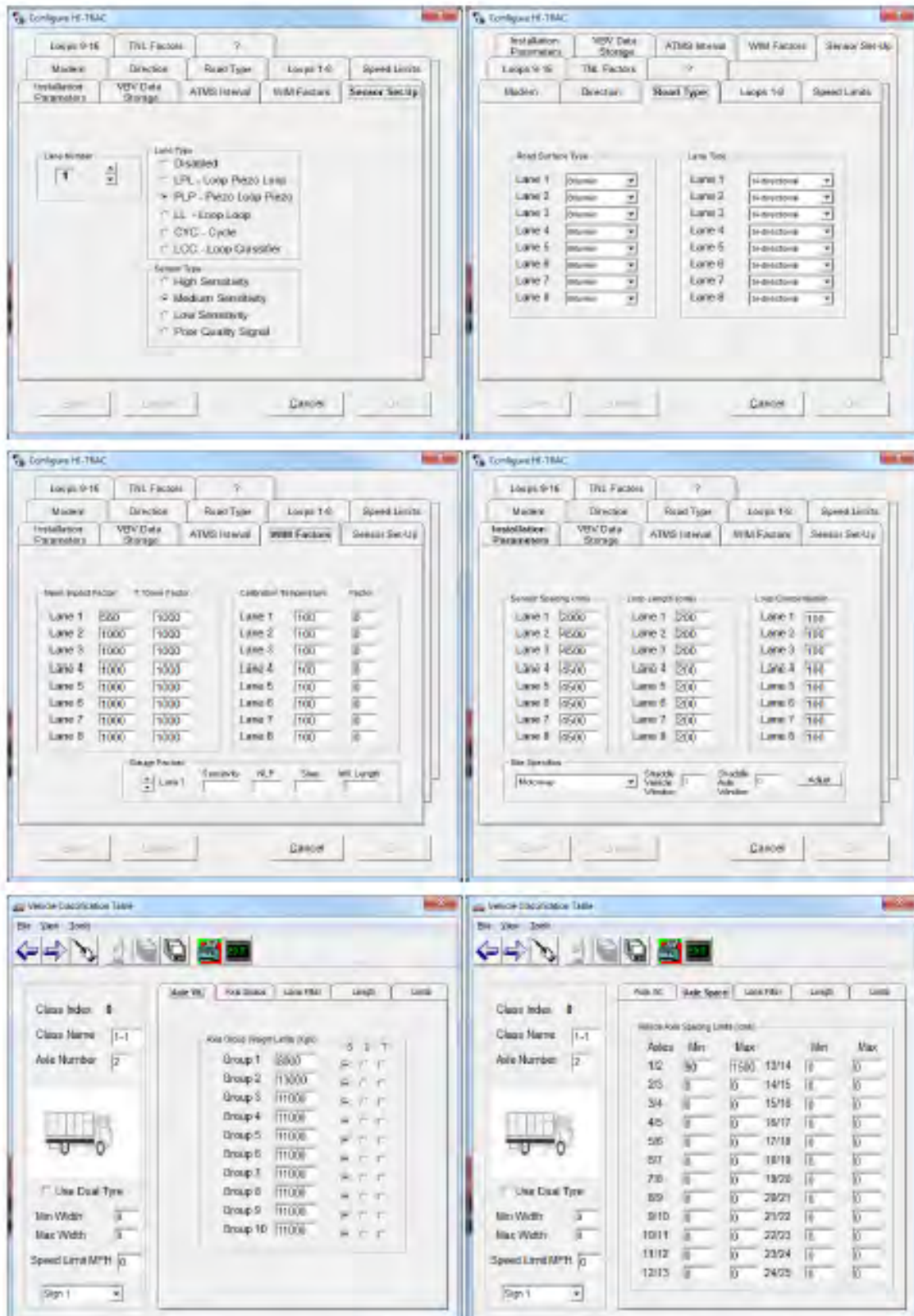


Figura 48 - Telas com as principais configurações do software de aquisição de dados no simulador de tráfego

5.7.1 Influência da temperatura nos resultados obtidos

Após a adequação do software e conferência das variáveis envolvidas no sistema, realizou-se a calibração dos sensores na temperatura de 30/32°C.

Para os testes foram realizados carregamentos diferenciados em uma faixa de temperatura próxima e em um segundo momento foram realizados testes mantendo o mesmo carregamento, fazendo leituras em diferentes períodos do dia, coletando-se assim dados de um mesmo carregamento a diferentes temperaturas (de 20°C até 38°C).

Na Figura 49 e 50 é apresentado um gráfico que demonstra a importância da temperatura na aquisição de dados, percebe-se que na temperatura para o qual o sistema foi calibrado, os valores das leituras coincidem em grande precisão com os valores das cargas aplicadas pelo simulador de tráfego, ficando dentro dos limites especificados de precisão. Já para as demais temperaturas, tanto menores quanto maiores, os dados começam a se distanciar consideravelmente do real valor aplicado, demonstrando dessa forma que a temperatura do pavimento influencia de forma muito significativa na precisão do equipamento, e que o mesmo precisa ser calibrado considerando um range de temperaturas as quais o pavimento estará exposto.

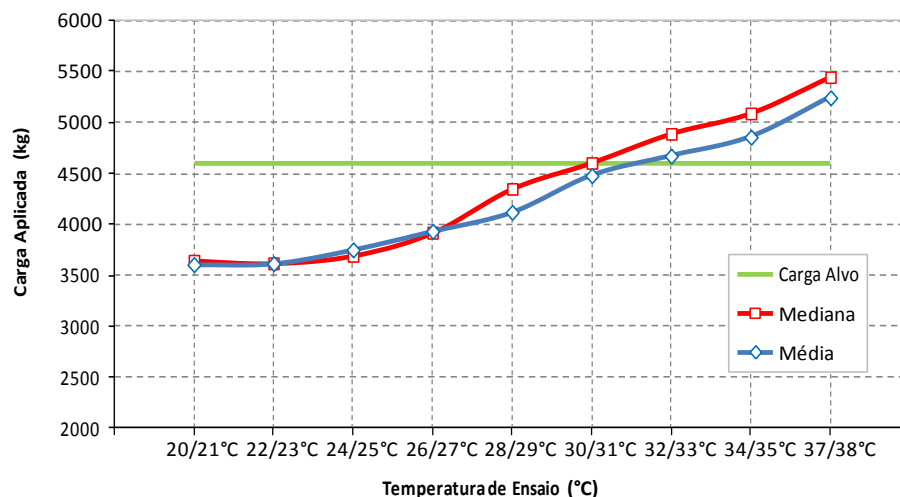


Figura 49 - Variação das leituras em função da temperatura do pavimento

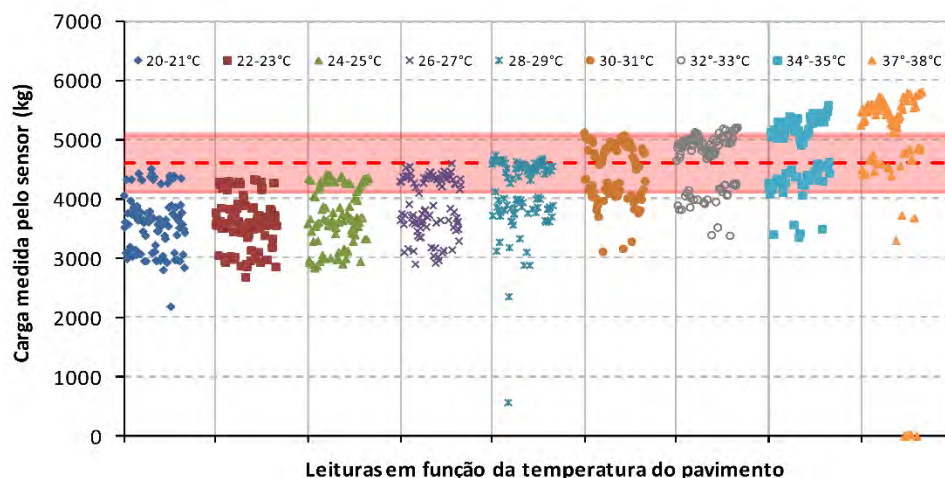


Figura 50 - Variação e dispersão das leituras em função da temperatura do pavimento

Na segunda série de testes realizados para verificação dos sensores de pesagem em movimento foram aplicadas distintos carregamentos na pista de testes através do semi-



eixo do simulados de tráfego em faixas próximas de temperatura para verificação da variabilidade das leituras obtidas.

Para cada nível de carregamento foram realizadas 100 leituras, os resultados de leitura de carga e sua variabilidade percentual são apresentados nos gráficos a seguir (Figura 51).

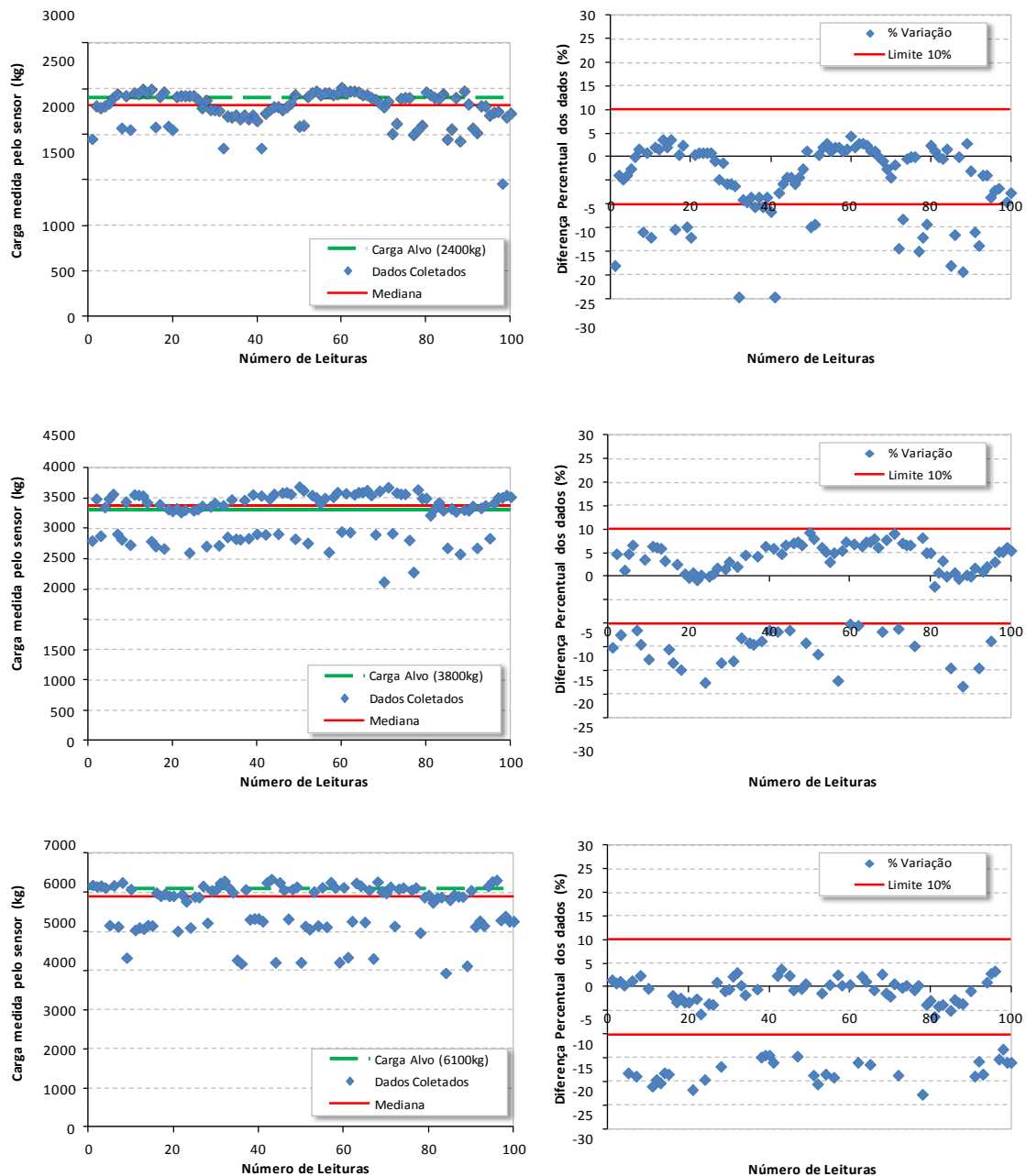


Figura 51 - Resultados para diferentes carregamentos

Observou-se um aumento na dispersão dos dados com a elevação da carga aplicada, isso pode estar ocorrendo em função de uma instabilidade da estrutura do simulador de tráfego com o aumento da carga aplicada sobre o pavimento.

6 INSTALAÇÃO ONSITE DO SISTEMA WIM – BR 290/RS FREEWAY

Esta etapa constitui-se na terceira fase proposta na pesquisa que consiste na definição de um segmento teste na rodovia para instalação de um equipamento piloto de pesagem em movimento (WIM) em duas faixas de tráfego para coleta contínua de dados de tráfego por um período mínimo de quatro semanas para definição do estudo do espectro de cargas atuantes na rodovia.

Será apresentada a evolução da pesquisa no que diz respeito à calibração do equipamento e coleta de dados do espectro de cargas através do equipamento instalado na Rodovia BR 290/RS - Freeway.

Conforme descrito e apresentado nos capítulos anteriores, esta pesquisa é composta por diversas etapas, sendo que nesta etapa final é contemplado o processo de calibração do equipamento instalado na rodovia, conforme plano apresentado anteriormente, ou seja, através de sucessivas passagens de veículos comerciais com carregamentos conhecidos e posteriormente a operacionalização do sistema com a coleta de dados para amostragem do espectro de cargas rodantes na Rodovia BR 290/RS – Freeway (Figura 52).



Figura 52 – Imagens da BR 290/RS – Freeway

6.1 LOCALIZAÇÃO E CARACTERÍSTICAS DA SEÇÃO DE TESTE

Na Figura 53 abaixo é apresentada a localização da rodovia BR 290/RS (*Freeway*) local onde foi implantado o segmento teste com a instalação do equipamento objeto da presente pesquisa.



Figura 53 – Localização da seção de testes (BR 290/RS - *Freeway*)

A localização exata para instalação do equipamento foi discutida juntamente com os técnicos da Concessionária, onde foi definido como sendo o local mais apropriado para instalação do Sistema WIM as proximidades do km72 (pista sul - sentido Porto Alegre - Osório) da rodovia BR-290/RS Freeway. Próximo ao local da instalação do sistema WIM tem-se a presença de uma balança fixa para eventuais verificações de cargas teste utilizadas na calibração dos sensores e também posteriormente, no futuro, executar verificações e/ou auxiliar em atuações de veículos que trafegam com excesso de carga.

A seguir são apresentadas algumas características do segmento teste. Realizou-se uma visita para conhecimento detalhado do local, observar as condições do entorno e pavimento (excesso de ATR, trecho em auge, declive ou em curva não são desejáveis), realizar medições de largura das faixas onde serão instalados os sensores e da largura total da rodovia naquele local.

A estrutura do pavimento, representada na Figura 54, consiste em 60 cm de espessura de areia usada como reforço do subleito, 30 cm de espessura de material originado do britador primário aplicado na sub-base, 15 cm de espessura de brita graduada empregada como base e 8 cm de espessura de revestimento de Concreto Asfáltico.



Figura 54 – Estrutura do pavimento dos trechos experimentais da BR 290/RS

A seguir, na Figura 55 é apresentada uma representação esquemática da aplicação do sistema WIM. No caso da instalação do equipamento na rodovia é importante que o sensor ocupe o máximo de extensão da faixa de monitoramento. O ideal é que o sensor termine junto à linha que divide as faixas. Para a correta pesagem é necessário garantir o pleno contato de ambos os rodados dos veículos com o sensor.

Dispõe-se na rodovia de três faixas de rolamento e acostamento em ambos os lados, totalizando uma largura final da pista de 16,25m. A aplicação dos sensores e do laço indutivo será realizado em duas faixas da rodovia (Faixa 2 e Faixa 3) com largura de 3,75m.

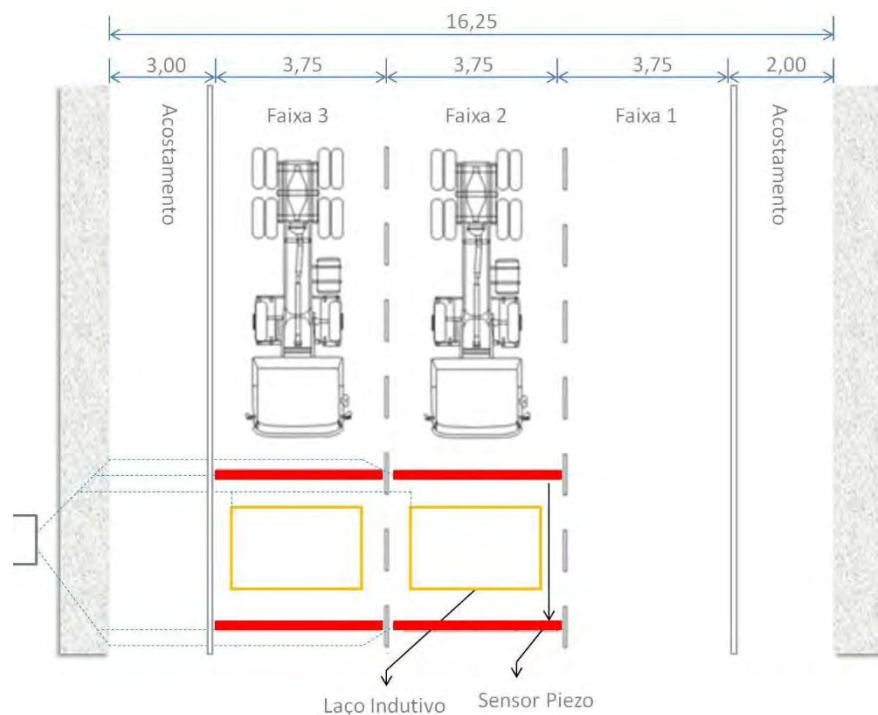


Figura 55 – Representação esquemática da instalação do equipamento WIM



Em função das dimensões de faixa verificadas no local, foram definidos como sendo adequados para atender as necessidades de projeto, quatro sensores piezos de 12' (3,64m) Classe I (WIM), conforme assinalado na tabela da Figura 56 que apresenta algumas características técnicas dos sensores utilizados.

Roadtrax III Traffic Sensors				measurement		
Sensor Length	Sensor Classification ¹	Capacitance with 100' cable ²	Weight ³ pounds (kg)	Visible Brass Length	Installed Length ⁴	Part Number ⁵
6' (1.82m)	Class II	4.00 nF ≤ C ≤ 10.00 nF	2.75 (1.25)	70 (1.78m)	76 (1.93m)	0-1005333-Y
8' (2.42m)	Class II	5.50 nF ≤ C ≤ 11.50 nF	2.80 (1.27)	94 (2.38m)	100 (2.54m)	1-1005333-Y
9' (2.73m)	Class II	6.25 nF ≤ C ≤ 12.25 nF	2.85 (1.30)	106 (2.69m)	112 (2.85m)	2-1005333-Y
10' (3.03m)	Class II	7.00 nF ≤ C ≤ 13.00 nF	2.90 (1.32)	118 (3.00m)	124 (3.15m)	3-1005333-Y
11' (3.33m)	Class II	7.75 nF ≤ C ≤ 13.75 nF	2.95 (1.34)	130 (3.30m)	136 (3.45m)	4-1005333-Y
12' (3.64m)	Class II	8.50 nF ≤ C ≤ 14.50 nF	3.00 (1.36)	139 (3.53m)	145 (3.68m)	5-1005333-Y
13' (3.94m)	Class II	9.25 nF ≤ C ≤ 15.25 nF	3.05 (1.39)	154 (3.91m)	160 (4.06m)	6-1005333-Y
6' (1.82m)	Class I (WIM)	4.00 nF ≤ C ≤ 10.00 nF	2.75 (1.25)	70 (1.78m)	76 (1.93m)	1-1005438-Y
8' (2.42m)	Class I (WIM)	5.50 nF ≤ C ≤ 11.50 nF	2.80 (1.27)	94 (2.38m)	100 (2.54m)	2-1005438-Y
9' (2.73m)	Class I (WIM)	6.25 nF ≤ C ≤ 12.25 nF	2.85 (1.30)	106 (2.69m)	112 (2.85m)	3-1005438-Y
10' (3.03m)	Class I (WIM)	7.00 nF ≤ C ≤ 13.00 nF	2.90 (1.32)	118 (3.00m)	124 (3.15m)	4-1005438-Y
11' (3.33m)	Class I (WIM)	7.75 nF ≤ C ≤ 13.75 nF	2.95 (1.34)	130 (3.30m)	136 (3.45m)	5-1005438-Y
12' (3.64m)	Class I (WIM)	8.50 nF ≤ C ≤ 14.50 nF	3.00 (1.36)	139 (3.53m)	145 (3.68m)	6-1005438-Y
13' (3.94m)	Class I (WIM)	9.25 nF ≤ C ≤ 15.25 nF	3.05 (1.39)	154 (3.91m)	160 (4.06m)	7-1005438-Y
2.0m (6'7")	Class II	4.94 nF ≤ C ≤ 10.94 nF	2.75 (1.25)	1.98 m (78")	2.14 m (84")	1-1005528-Z
2.5m (8'3")	Class II	6.17 nF ≤ C ≤ 12.17 nF	2.85 (1.30)	2.48 m (98")	2.64 m (104")	2-1005528-Z
3.0m (9'11")	Class II	7.40 nF ≤ C ≤ 13.40 nF	2.95 (1.35)	2.98 m (117")	3.14 m (123")	3-1005528-Z
3.5m (11'6")	Class II	8.63 nF ≤ C ≤ 14.63 nF	3.05 (1.40)	3.48 m (137")	3.64 m (143")	4-1005528-Z
4.0m (13'2")	Class II	9.87 nF ≤ C ≤ 15.87 nF	3.15 (1.45)	3.98 m (157")	4.14 m (163")	5-1005528-Z
4.5m (14'10")	Class II	11.09 nF ≤ C ≤ 17.09 nF	3.25 (1.50)	4.48 m (177")	4.64 m (183")	6-1005528-Z
5.0m (16'6")	Class II	12.32 nF ≤ C ≤ 18.32 nF	3.35 (1.55)	4.98 m (196")	5.14 m (202")	7-1005528-Z
5.5m (18'2")	Class II	13.55 nF ≤ C ≤ 19.55 nF	3.45 (1.60)	5.48 m (216")	5.64 m (222")	8-1005528-Z
2.0m (6'7")	Class I (WIM)	4.94 nF ≤ C ≤ 10.94 nF	2.75 (1.25)	1.98 m (78")	2.14 m (84")	1-1005527-Z
2.5m (8'3")	Class I (WIM)	6.17 nF ≤ C ≤ 12.17 nF	2.85 (1.30)	2.48 m (98")	2.64 m (104")	2-1005527-Z
3.0m (9'11")	Class I (WIM)	7.40 nF ≤ C ≤ 13.40 nF	2.95 (1.35)	2.98 m (117")	3.14 m (123")	3-1005527-Z
3.5m (11'6")	Class I (WIM)	8.63 nF ≤ C ≤ 14.63 nF	3.05 (1.40)	3.48 m (137")	3.64 m (143")	4-1005527-Z
4.0m (13'2")	Class I (WIM)	9.87 nF ≤ C ≤ 15.87 nF	3.15 (1.45)	3.98 m (157")	4.14 m (163")	5-1005527-Z
4.5m (14'10")	Class I (WIM)	11.09 nF ≤ C ≤ 17.09 nF	3.25 (1.50)	4.48 m (177")	4.64 m (183")	6-1005527-Z
5.0m (16'6")	Class I (WIM)	12.32 nF ≤ C ≤ 18.32 nF	3.35 (1.55)	4.98 m (196")	5.14 m (202")	7-1005527-Z
5.5m (18'2")	Class I (WIM)	13.55 nF ≤ C ≤ 19.55 nF	3.45 (1.60)	5.48 m (216")	5.64 m (222")	8-1005527-Z

1. Class II sensors have a uniformity of ±20% and are typically used for Classification purposes. Class I sensors have a uniformity of ±7% and are typically used for Weigh in Motion applications.

2. Additional cable has a capacitance of 27 pF/ft (89 pF/m) or 2.7 nF/100' (2.2 nF/25m). Provided with each sensor is a test certificate with the actual tested value for the sensor. Field tests should be within ±20% of these values at room temperature (70F or 23C).

3. All sensors are packaged 2 per box. The box weighs 1.5 lbs (0.7 kg).

4. This length refers to the installed length of the sensor. This is the minimum lane width for the installed sensor.

5. The suffix refers to the cable length. Cable lengths for -Y are as follows: -1 @ 100', -2 @ 150', -3 @ 200', -4 @ 250', -5 @ 300'. Cable lengths for the -Z are as follows: -1 @ 35m, -2 @ 50m, -3 @ 75m, and -4 @ 100m.

Figura 56 – Características técnicas dos sensores para implantação na Freeway

6.2 DETALHAMENTO DA INSTALAÇÃO DOS SENSORES WIM – BR-290/RS

Neste item são apresentados, de forma detalhada, os procedimentos adotados para a instalação dos sensores piezoelétricos do sistema WIM na BR 290/RS - *Freeway*. É apresentado um registro fotográfico das atividades desenvolvidas em campo e descrições dos procedimentos e ferramentas utilizadas no trabalho.

Resumidamente, no processo de instalação é necessária a execução de cortes superficiais no revestimento nas dimensões compatíveis ao tipo de sensor, de acordo com a especificação do produto, conforme demonstrado na Figura 57 e Figura 58.

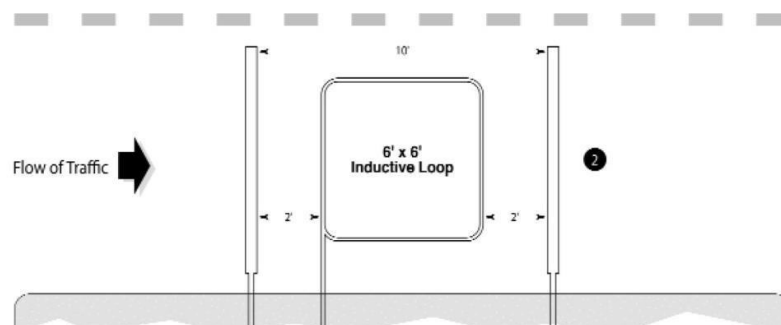


Figura 57 - Layout típico de instalação de sensores WIM

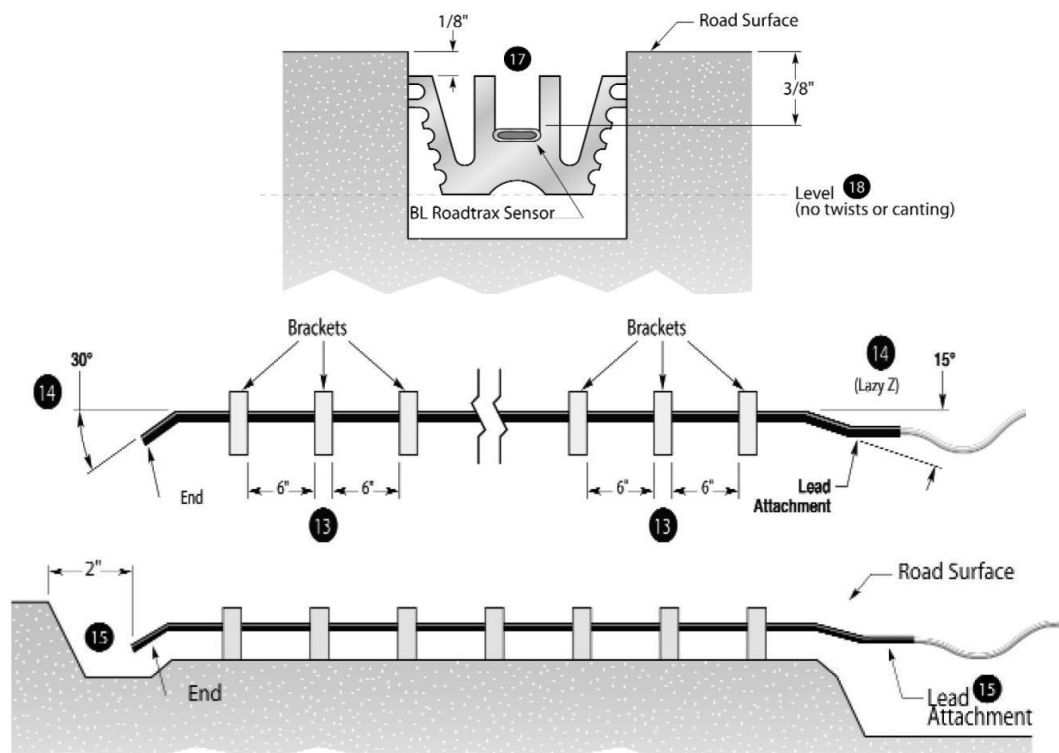


Figura 58 - Sistema de centralização, alinhamento e fixação dos sensores dentro do corte de instalação através de ganchos específicos (Fonte: Manual de instalação do fabricante)

A sequência dos procedimentos de instalação seguida foi àquela definida e apresentada no manual desenvolvido pelo fabricante dos sensores e apresentada detalhadamente no relatório de acompanhamento anterior (instalação do sistema WIM na Pista Experimental LAPAV/UFRGS). O conjunto de procedimentos segue o padrão de montagem pré-estabelecido e, conseqüentemente, os respectivos ajustes quanto à posição espacial horizontal e posição vertical, sendo, via de regra, a profundidade o critério de controle mais rigoroso entre as atividades. Por fim aplica-se a resina do tipo epóxi com rigidez compatível ao funcionamento do sensor.

6.2.1 Etapas Preliminares

- **Sinalização e desvio do tráfego da rodovia**

Para a instalação dos sensores na rodovia realizou-se a sinalização e desvio do tráfego nas proximidades do local de trabalho para assim garantir a segurança tanto da equipe de instalação quanto dos usuários da rodovia. Na Figura 59 é apresentada uma imagem do trecho sinalizado para a realização dos trabalhos, tanto de limpeza do revestimento quanto de instalação do equipamento (realização dos cortes no revestimento e limpeza dos mesmos, preparação e inserção dos sensores em seus respectivos locais e posterior selamento dos cortes após o término do processo de instalação).



Figura 59 – Sinalização e desvio do tráfego para realização da instalação dos sensores

- **Regulagem do equipamento de corte**

Para a correta realização dos cortes, principalmente no que se refere à profundidade de instalação dos sensores, ponto mais crítico no processo de instalação para seu correto desempenho, realizou-se uma cuidadosa regulagem das serras de corte, para tal foram realizados alguns “cortes teste” em um revestimento próximo ao local de instalação definitiva dos sensores conforme Figura 60.



Figura 60 – Processo de regulagem da profundidade de corte do equipamento

Nos itens a seguir serão descritas todas as atividades de instalação do sistema WIM realizado na seção teste da BR 290/RS, onde foram instaladas duas linhas de sensores piezoelétricos de 3,64m de comprimento (12'), classe I (WIM).

6.2.2 Etapas de instalação dos sensores na pista experimental

a) Limpeza das Faixas:

Não foi necessária uma limpeza específica das faixas onde foram instaladas as linhas de sensores pelo fato de não haver sujeira acumulada na pista, conforme pode ser observado na Figura 61.

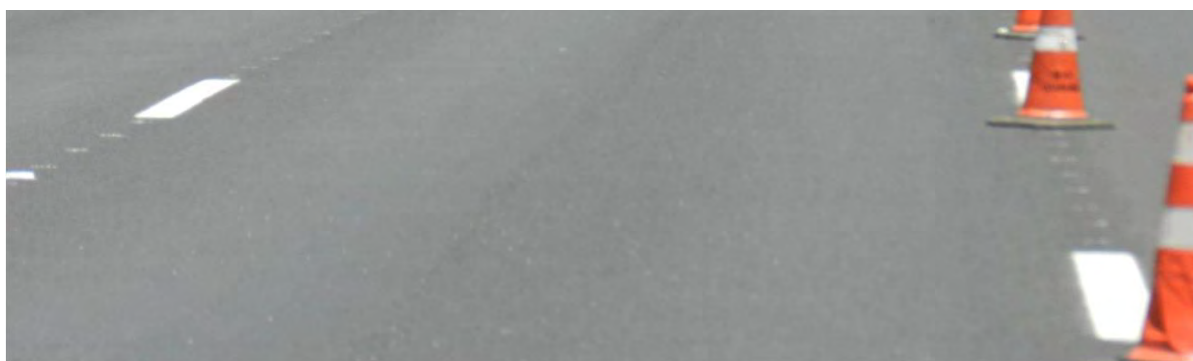


Figura 61 – Pavimento limpo para demarcação dos locais de corte

b) Demarcação e Pintura dos Locais de Corte no Pavimento:

O espaçamento entre os sensores e distanciamento do laço indutivo, conforme recomendado pelo fabricante e utilizado na presente pesquisa é apresentado na Figura 62, a partir da definição deste espaçamento procedeu-se com a marcação no pavimento dos locais para a posterior realização dos cortes.

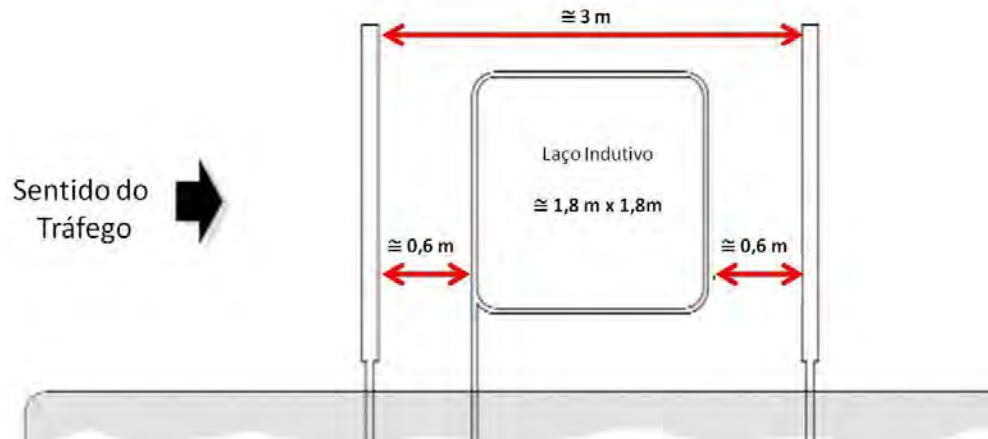


Figura 62 – Espaçamento dos sensores e laço indutivo

A demarcação foi realizada através da locação espacial de pontos notáveis realizados com o auxílio de trena e régua metálica ao longo da seção transversal do pavimento. Na Figura 63 é demonstrado o processo de marcação para instalação dos sensores piezoelétricos e dos laços indutivos. Depois de realizada a marcação dos pontos notáveis procedeu-se com uma pintura com tinta *Spray*, ligando os pontos notáveis por linhas esticadas, ficando as marcações dos cortes pintadas no revestimento, demarcando assim o local preciso de corte para instalação dos sensores.



Figura 63 - Marcação e pintura para instalação dos sensores

Na Figura 64 é demonstrada a disposição do equipamento tanto dos sensores piezoelétricos e laços indutivos quanto dos cabos que ligam os sensores ao equipamento de aquisição de dados, conforme mostrado na legenda.

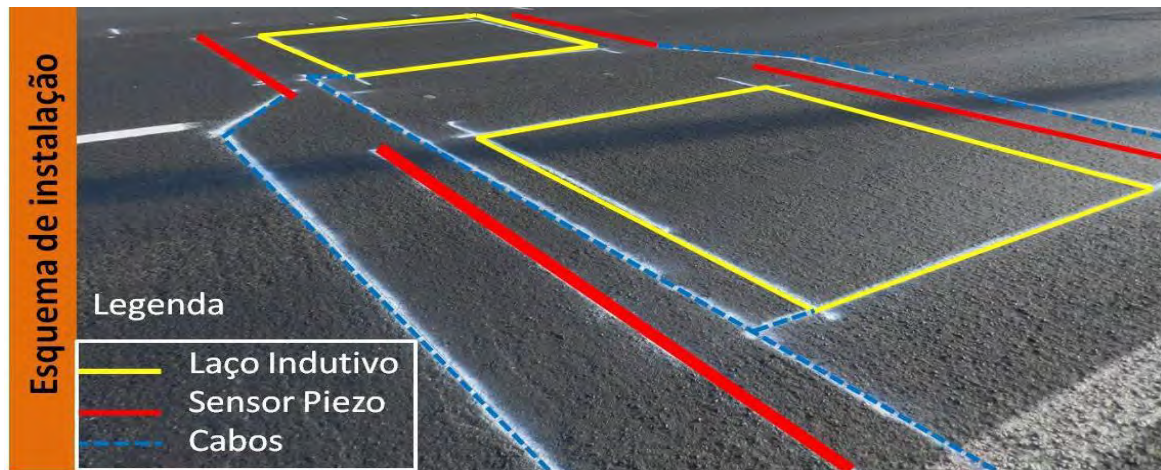


Figura 64 - Esquema de instalação do sistema WIM em duas faixas de rolamento

c) Corte do Pavimento:

O corte do pavimento foi realizado por um equipamento portátil dotado de uma serra circular diamantada, própria para cortes em estruturas maciças, utilizada correntemente em cortes de pavimentos asfálticos (Figura 65). A largura necessária para instalação (20mm) exige a execução de dois cortes paralelos para obter a espessura de corte especificada para o tipo de sensor a ser instalado. Foram realizados dois cortes paralelos e posteriormente realizada a retirada de material do revestimento entre os dois cortes.



Figura 65 - Realização dos cortes no pavimento

**d) Limpeza do Corte:**

Após a realização dos cortes, os mesmos foram submetidos a um procedimento de limpeza, conforme demonstrado na Figura 66. Fez-se a retirada do revestimento existente entre os dois cortes com o auxílio de martelo e talhadeira.

Para a verificação da conformidade das dimensões dos cortes especificados realizou-se a conferência através de um gabarito metálico produzido especificamente para esta finalidade. Conforme recomendações do fabricante as dimensões para instalação são as seguintes: 3/4" (20mm) com tolerância de ($\pm 1/16"$ ou $\pm 2\text{mm}$) com profundidade mínima de 1" (25mm), dimensões estas reproduzidas no gabarito de conferência.



Figura 66 - Limpeza dos cortes e conferência de dimensões



Figura 67 – Gabarito para conferência das medidas dos cortes executados e espaçadores com dois tamanhos distintos (20mm e 25mm)

Além da conferência das dimensões dos cortes com o gabarito, utilizou-se ainda os espaçadores (20mm e 25mm), conforme apresentado na Figura 67, para garantir a correta instalação (travamento) dos sensores dentro dos cortes realizados em caso de pequenos desvios ou imperfeições que eventualmente ocorreram durante a execução dos cortes no pavimento.

e) Preparação dos sensores:

Cada sensor vem em embalagens individuais (Figura 68) e são preparados momentos antes da instalação, são fornecidos os elementos auxiliares como espaçadores, gabaritos, cabos, entre outros. A preparação dos sensores consiste na sua inspeção visual, os mesmos são verificados se estão retos, sem torções ou quebras, é recomendada a utilização de luvas de látex para manuseio dos sensores.



Figura 68 – Embalagem com sensores piezoelétricos

Após a inspeção visual dos sensores foram fixados os espaçadores conforme recomendação do fabricante (Figura 69) e realizadas as dobras nas extremidades conforme manual de instalação e demonstrado nas imagens acima.

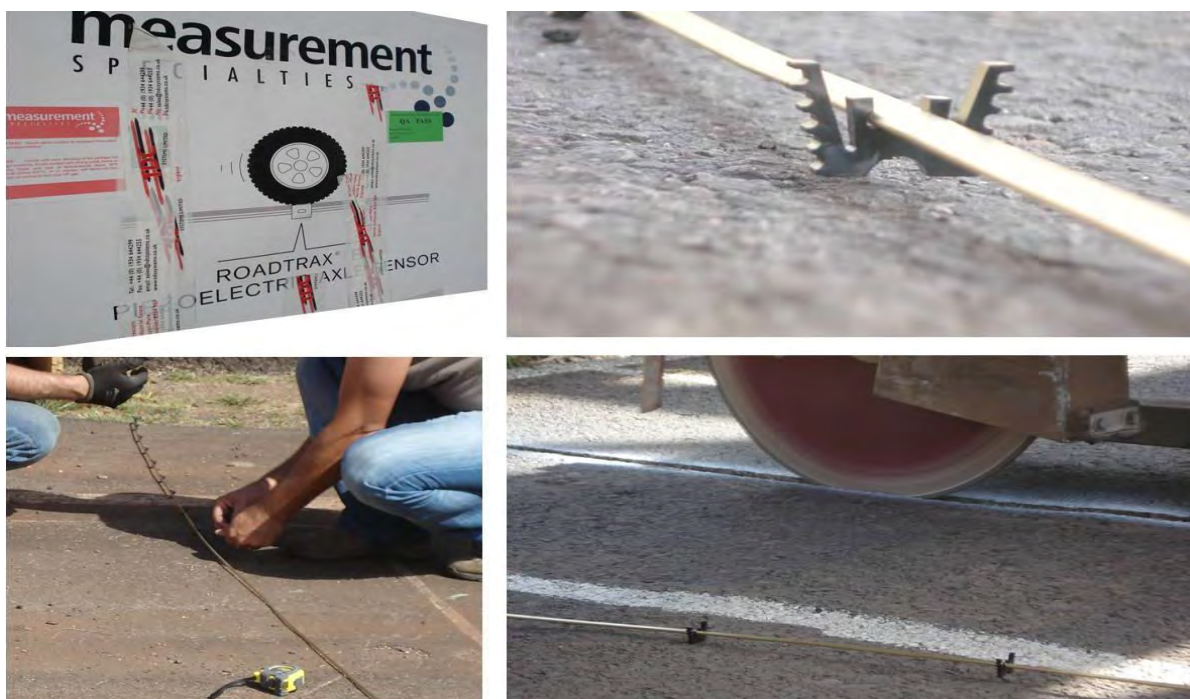


Figura 69 – Preparação dos sensores para instalação

f) Instalação dos sensores:

Após preparação dos sensores estes foram posicionados no interior das canaletas. O sensor recebe ajustes nos respectivos espaçadores para que o mesmo esteja corretamente alinhado e na profundidade certa.

Para garantir a profundidade correta do sensor ($3/8"$ - 9mm) é utilizado um gabarito especificamente desenvolvido para tal e faz parte dos componentes auxiliares de instalação fornecidos pelo fabricante . A Figura 70 apresenta as etapas do processo de instalação dos sensores.

Após a acomodação do sensor no interior das canaletas de corte realizado no pavimento, o mesmo foi posicionado na profundidade correta com o auxílio do gabarito que garante a sua profundidade adequada. Após a finalização do posicionamento, realizaram-se os preparativos para aplicação do “grout” - resina que permite o fechamento dos cortes e finalização da instalação.

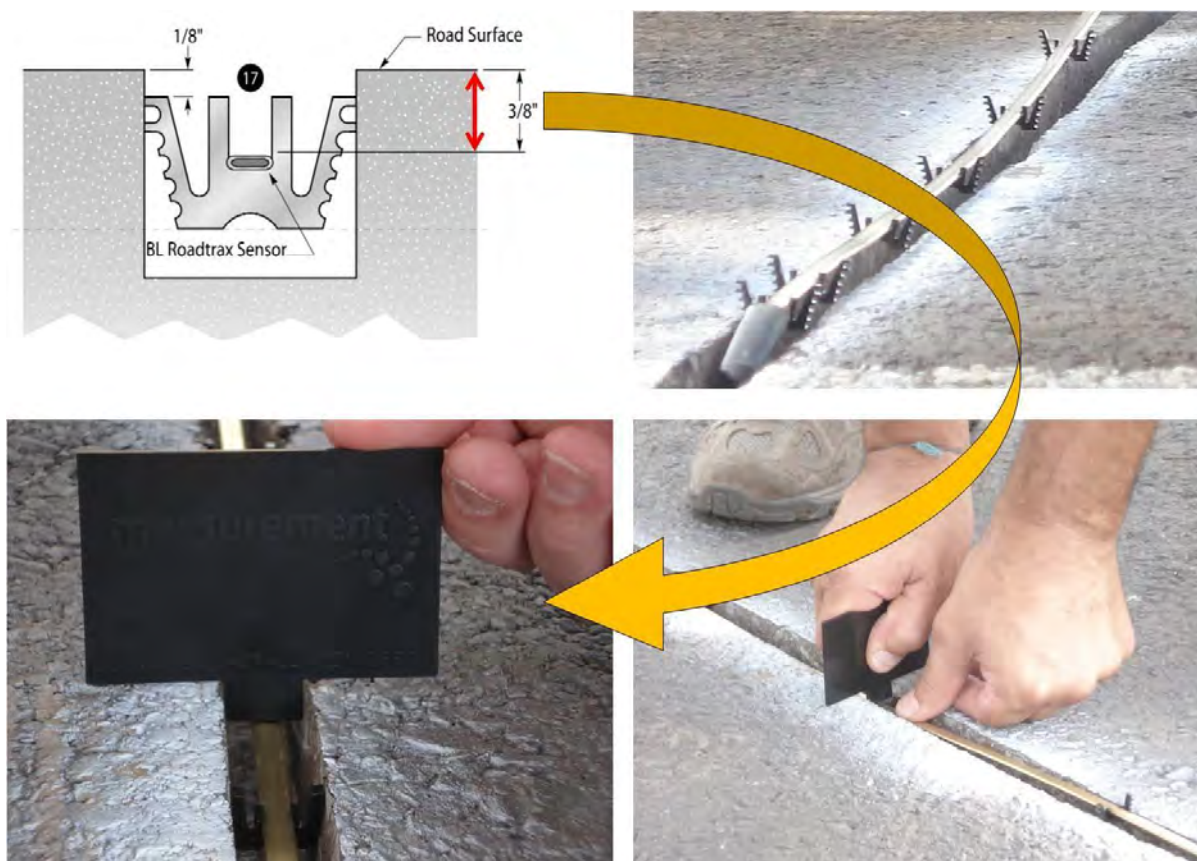


Figura 70 - Processo de instalação dos sensores

g) Preparação e aplicação do “grout” e selagem:

O “grout” é uma resina (tipo epóxi) que fixa os sensores dentro das canaletas abertas através de cortes no pavimento. Os componentes da resina são misturados momentos antes da aplicação com o auxílio de um misturador adaptado a uma furadeira comum (Figura 71).



Novamente antes da aplicação da resina para selamento dos sensores foi realizada uma inspeção nas canaletas de corte e realizada uma limpeza final das mesmas quando necessário para garantir que nenhuma impureza ficasse dentro dos cortes.



Figura 71 – Preparação do grout para selagem dos cortes

Conforme recomendação de instalação realizou-se a colocação de fita adesiva na borda lateral ao longo do corte para garantir o acabamento final da resina de selagem.

Na selagem, etapa final do processo de instalação, quando os sensores alinhados dentro das canaletas de corte recebem a massa epóxi (Figura 72), deve-se tomar cuidado para evitar a formação de bolsões de ar, pois os mesmos podem comprometer o funcionamento futuro do sensor.

A resina deve ser espalhada de forma homogênea com o auxílio de uma espátula ou colher de pedreiro, preferencialmente em mais de uma camada com cuidado em função da rápida secagem depois de preparada.



Figura 72 - Selagem dos cortes após instalação dos sensores

h) Finalização do “grout” - Acabamento:

Após instalação completa dos sensores e cura da resina (Grout) foi realizado o acabamento com o auxílio de uma lixadeira (Figura 73) para deixar nivelada a resina com a superfície do pavimento. Para evitar o acúmulo de água pode-se deixar ainda uma leve curvatura na superfície (convexa).



Figura 73 – Processo de acabamento do Grout

6.2.3 Aspecto Final da instalação

Na Figura 74 é apresentado um aspecto final da instalação dos sensores piezoelétricos e do laço indutivo na terceira faixa de rolamento da rodovia. A utilização da resina epóxi (Grout) foi realizada somente nas canaletas abertas para a inserção dos sensores (conforme legenda), nos cortes onde foram instalados os laços indutivos e nos locais de passagem dos cabos que ligam ao equipamento de coleta dos dados foi utilizado um mástique asfáltico.

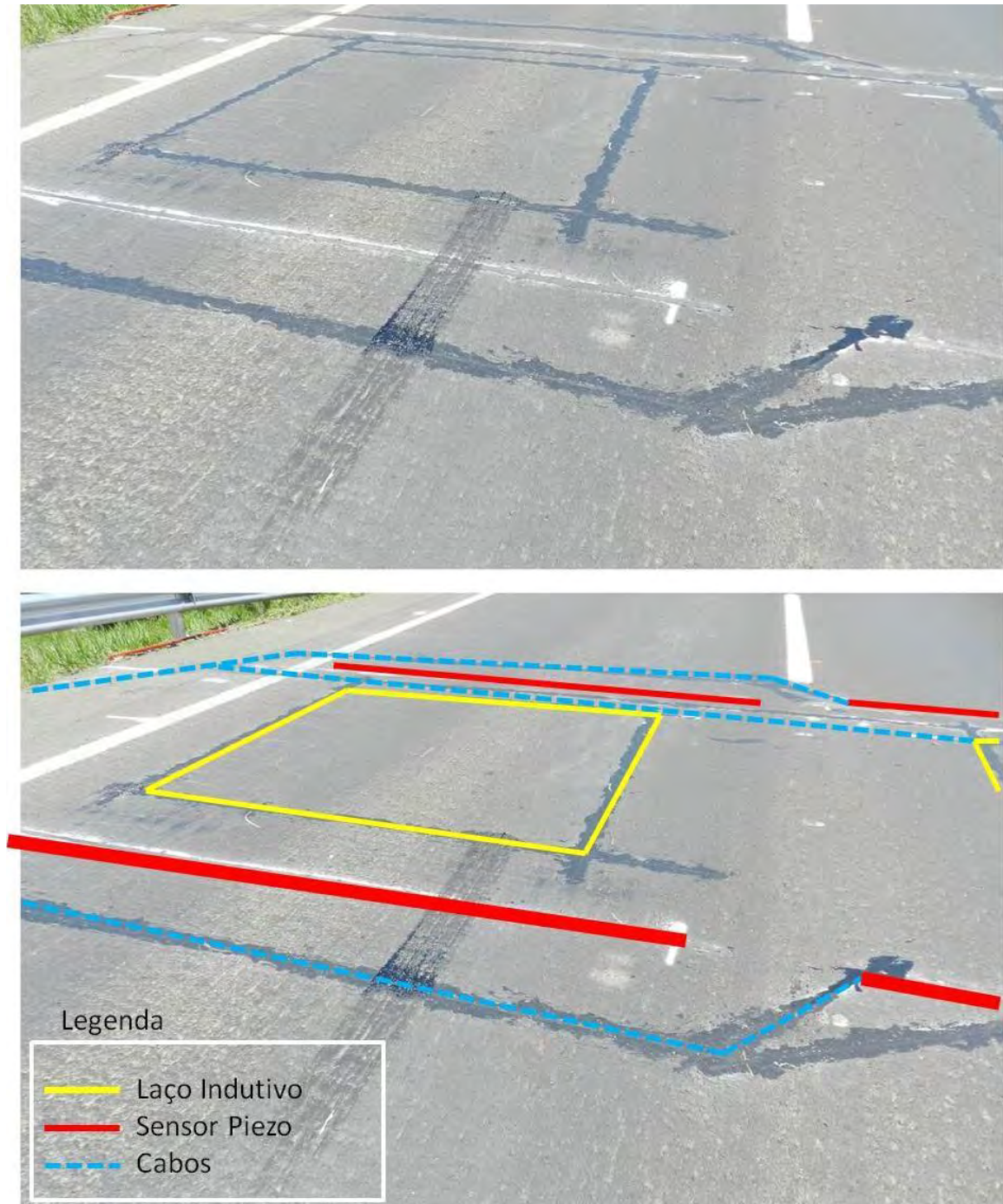


Figura 74 – Aspecto final após instalação do equipamento WIM

6.3 OPERACIONALIZAÇÃO DO SISTEMA WIM INSTALADO NA BR 290/RS FREEWAY

A etapa final desta pesquisa contempla a coleta e análise dos dados para amostragem do espectro de cargas adquiridos através da implantação *onsite* na *Freeway* do sistema de pesagem em movimento (WIM). Nesta etapa faz-se a validação dos dados obtidos pelo sistema devidamente calibrado, discutiu-se juntamente com a Concessionária e uma equipe de consultores da S&T o melhor agrupamento das cargas existentes para definição do espectro de cargas existentes na rodovia.

Após a definição de um segmento teste na rodovia para instalação do equipamento piloto WIM em duas faixas de tráfego foi realizado a calibração dos sensores conforme será apresentado no decorrer do presente relatório. Para a análise do espectro de cargas foi realizada a coleta contínua de dados de tráfego por um período de 5 semanas (00:00h do dia 13/03/2013 até as 16:00h 15/04/2013) para definição do estudo do espectro de cargas atuantes na rodovia.

Na Figura 75 é apresentada uma visão geral do local de monitoramento, com o pórtico no qual ficam instalados os sistemas de aquisição e transmissão de dados além de uma câmera que permite o acompanhamento do sistema.



Figura 75 – Características gerais do site de implantação na BR 290/RS - Freeway

A seguir, na Figura 76 é apresentada uma representação esquemática da aplicação do sistema WIM. No caso da instalação do equipamento na rodovia é importante que o sensor ocupe o máximo de extensão da faixa de monitoramento. O ideal é que o sensor termine junto à linha que divide as faixas. Para a correta pesagem é necessário garantir o pleno contato de ambos os rodados dos veículos com o sensor.

Dispõe-se na rodovia de três faixas de rolamento e acostamento em ambos os lados, totalizando uma largura final da pista de 16,25m. A instalação dos sensores e do laço indutivo foi realizado em duas faixas da rodovia (Faixa 2 e Faixa 3) com a largura de 3,75m para cada faixa de rolamento.

Em função das dimensões de faixa verificadas no local, foram definidos como sendo adequados para atender as necessidades de projeto, quatro sensores piezos de 12' (3,64m) Classe I (WIM), conforme mostrado na Tabela de Características Técnicas dos sensores utilizados apresentados anteriormente

Na Figura 77 é demonstrada a disposição do equipamento tanto dos sensores piezoelétricos e laços indutivos quanto dos cabos que ligam os sensores ao equipamento de aquisição de dados, conforme mostrado na legenda.

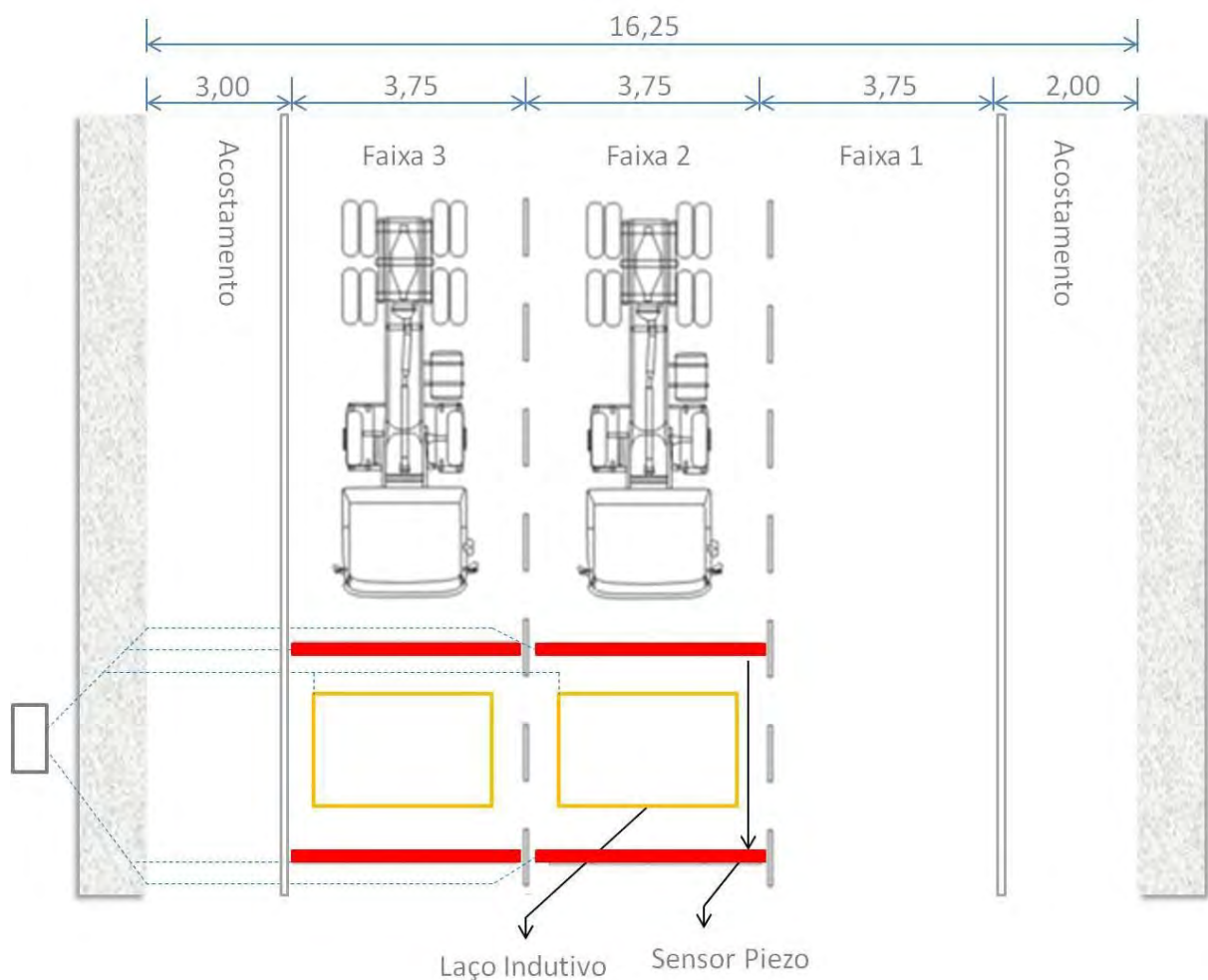


Figura 76 – Representação esquemática da instalação do equipamento WIM

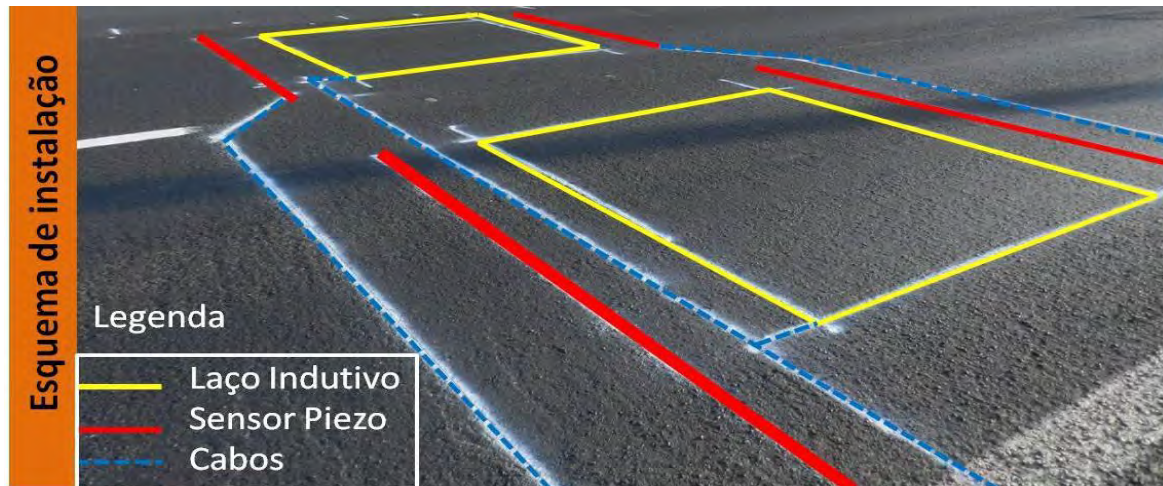


Figura 77 - Esquema de instalação do sistema WIM em duas faixas de rolamento

6.4 PROCESSO DE CALIBRAÇÃO E AQUISIÇÃO DE DADOS

Neste item do relatório serão apresentados e descritos os processos de calibração *onsite* dos sensores piezoelétricos. Estes processos são realizados através de passagens sucessivas de veículos com cargas conhecidas e em diferentes períodos do dia para realizar as medições dos carregamentos em distintas temperaturas da pista.

6.4.1 Precisão do sistema e Calibração dos sensores

Todos os sensores que medem grandezas no mundo real possuem tolerâncias. Não existe um sensor absolutamente preciso e são muitos os fatores que influenciam a tolerância e a confiabilidade das medições realizadas por este tipo de equipamento. A confiabilidade do equipamento está relacionada com a sua calibração, sendo esta um procedimento fundamental para assegurar a confiabilidade dos dados obtidos.

Apesar de suas grandes vantagens de utilização descritas anteriormente durante a pesquisa, os sistemas de pesagem em movimento de alta velocidade (HS-WIM) têm algumas limitações. A questão principal está relacionada com a precisão. A pesagem de veículos em movimento visa obter um valor estático (o peso do veículo) com o veículo em condição dinâmica.

Diversos fatores influenciam nessa medição, sendo os principais:

- Carregamento do veículo;
- A forma do sinal a ser processado;
- A suspensão do veículo, devido à interação dinâmica entre o veículo e a rodovia;
- A configuração do veículo (número de semirreboque, número de eixos);
- Uniformidade da superfície do revestimento e das características do pavimento;
- A velocidade de passagem;



Além disso, como os sensores são expostos ao completo volume de cargas de tráfego e estão montados na superfície do pavimento, eles podem ter um ciclo de vida limitado. Outra questão complicada é a calibração e avaliação de precisão do HS- WIM (Jacob *et al.* 2000, ASTM 2002). Todos estes fatores mencionados entram como uma variável no sistema e se o mesmo não está corretamente calibrado o nível de precisão é significativamente afetado, gerando resultados não coerentes com a realidade.

A calibração garante que o peso estático estimado pelo sistema WIM se aproxime do peso estático real. A calibração é responsável por levar em conta os efeitos e características específicas daquela instalação tais como temperatura do pavimento, velocidades dos veículos e condições do pavimento. Os procedimentos de calibração podem incluir uma fase do teste de aceitação e uma fase de recalibração.

A precisão dos sistemas WIM é função de quatro principais fatores:

- Dinâmica do veículo;
- Integridade, composição e projeto do pavimento;
- Variância inerente no sistema WIM; e
- Calibração.

A dinâmica do veículo é dependente da rugosidade da superfície da rodovia, tipo de suspensão do veículo, balanceamento dinâmico do veículo, peso do veículo, velocidade do veículo, manobras do motorista, etc. Embora a instalação dos sistemas WIM tenha sido feita em pavimentos de boa qualidade, algumas vezes ocorrem deteriorização inesperada ou anomalias estruturais.

A seguir serão descritos alguns fatores que podem provocar erros nos sistemas. O erro em qualquer equipamento de pesagem de veículos é a diferença entre o peso indicado e o “peso estático real”, o qual é definido como o peso sob condições controladas e perfeitas, significando com isto, entre outras coisas, que o local da balança está absolutamente nivelado, que a suspensão do veículo está numa posição de repouso e não apresenta atrito de qualquer natureza, o veículo não está acelerando nem desacelerando.

A diferença entre a indicação do sensor e a carga aplicada é caracterizada pelo chamado “erro intrínseco do instrumento”. Já a diferença entre a carga aplicada e o “peso estático real” em outras condições, que não as controladas como anteriormente dito, pode ser chamada de erro devido aos “fatores externos”.

iii. Erros devidos a fatores internos

O erro intrínseco pode ser determinado usando-se uma máquina de teste ou um peso (ou carga) padrão. Dependendo da tecnologia, ele pode ser mais ou menos influenciado por fatores tais como a temperatura, carga com característica excêntrica (desequilibrada), inclinação, curvatura, forças laterais, repetibilidade, aquecimento, umidade, susceptibilidade eletromagnética, etc.

Equipamentos utilizados para aplicação de lei devem, usualmente, ter seu modelo aprovado (aprovação de tipo - “*type approval*”) por organizações competentes e oficialmente incumbidas desta missão (no Brasil, INMETRO e seus agentes credenciados). Devem também ser individualmente testados antes de entrar em operação (aprovação pré-operação ou inicial).



iv. Erros devidos a fatores externos

Existem inúmeros fatores externos que podem provocar erros de leitura nos equipamentos de pesagem, dentre eles podemos citar:

- Inclinação do veículo;
- Suspensão do veículo, atrito (friccional) na suspensão;
- Reação à frenagem e movimento oscilatório dos veículos (chassis e eixos)
- Frisos dos pneus;
- Forças aerodinâmicas;
- Instalação dos sensores (nivelamento);
- Rugosidade e planicidade do pavimento.

A calibração de um equipamento pode ser definida como sendo um procedimento experimental através do qual são estabelecidas sob condições específicas, as relações entre os valores indicados por um instrumento de medição ou valores representados por uma medida materializada e os valores correspondentes a estas grandezas, estabelecidos por padrões reconhecidos por entidades legalmente credenciadas.

Um fator muito importante é a escolha dos padrões, estes devem apresentar erros sensivelmente menores do que os erros esperados pelo medidor que de será calibrado. Costuma-se adotar como padrão, um elemento que nas condições de calibração em cada ponto, apresente uma incerteza não superior a um décimo da incerteza esperada para o mensurando a calibrar. No caso da calibração dos sensores piezoelétricos instalados na rodovia foram utilizados veículos com cargas conhecidas, estas cargas foram aferidas em balança fixa, homologadas por órgão competente.

O resultado de uma correta calibração permite o estabelecimento dos valores das grandezas mensuradas para indicações confiáveis, juntamente com a determinação das correções que devem ser efetuadas (ajustes). O ajuste corresponde a uma operação complementar, normalmente efetuada após uma calibração, quando o desempenho metrológico de um sistema de medição não está em conformidade com os padrões de comportamento esperados. Trata-se de uma "regulagem interna" do sistema de medição, executada por técnico especializado. Visa fazer coincidir, da melhor forma possível, o valor indicado no sistema de medição, com o valor correspondente do mensurado submetido. Por exemplo, a alteração do fator de amplificação (sensibilidade) de um sistema de medição por meio de um potenciômetro interno.

A Figura 78 ilustra o método de calibração direta. O mensurado é aplicado sobre o sistema de medição por meio de medidas materializadas, cada qual com seu valor verdadeiro convencional suficientemente conhecido. Utilizou-se para o processo de calibração uma Massa Padrão, ou seja, um veículo com peso conhecido e aferido por um equipamento com confiabilidade assegurada por órgão regulamentador (balança de precisão).

Para que o valor da medida materializada, ou o indicado pelo SMP (Sistema de medição padrão) possa ser adotado como VVC (Valor verdadeiro convencional) é necessário que seus erros sejam sensivelmente menores que os erros esperados no SMC (Sistema de medição a calibrar).

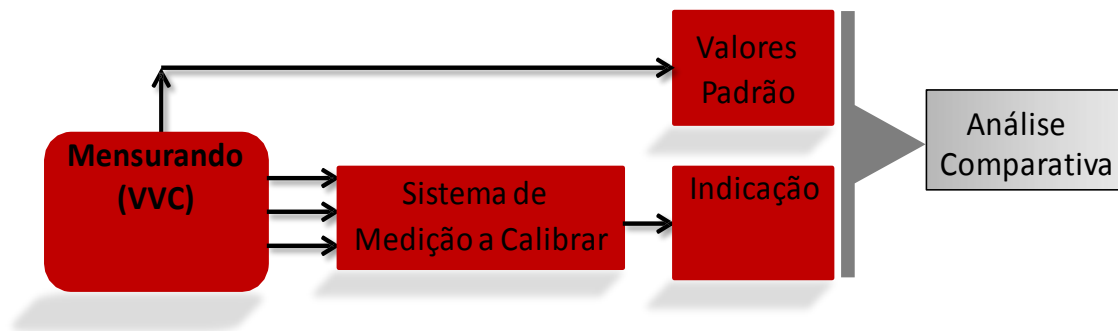


Figura 78 – Esquematização de um método de calibração direta

É necessário dispor de uma coleção de medidas materializadas suficientemente completa para cobrir toda a faixa de medição do instrumento. As indicações dos sistemas de medição são confrontadas com cada valor verdadeiro convencional e a correção e sua incerteza é estimada por meio de medições repetitivas.

No caso em questão, conforme será descrito nos itens a seguir, foram utilizados dois veículos com configurações distintas (comprimento, configuração de eixos, capacidade de carga, etc.) para a realização de medições sucessivas para verificação da conformidade das leituras realizadas pelos sensores do sistema WIM com a carga real dos veículos (cargas aferidas em equipamento padrão e regulamentado).

6.4.2 Definição dos veículos e níveis de carga utilizados

Os níveis de cargas e os tipos de veículos empregados nesta fase da pesquisa para calibração do equipamento instalado nas duas faixas da rodovia foram definidos a partir de critérios discutidos entre as equipes envolvidas na pesquisa, sendo assim definidas:

- Tipo de VEÍCULO TESTE:

Como Veículos de Teste foram utilizados os seguintes caminhões: Caminhão Trucado classe 3C (**Veículo 1**) e um Caminhão Trator simples + Semi-Reboque com 3 eixos classe 2S3 (**Veículo 2**) (Figura 79).

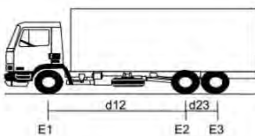
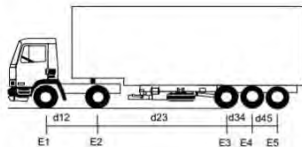
Nº DE EIXOS	PBT / CMT MÁX. (t)	CARACTERIZAÇÃO	CLASSE	CÓDIGO	
	3	23 (24,2)	CAMINHÃO TRUCADO E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2E3 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. d12 > 2,40 m 1,20 < d23 ≤ 2,40 m	3C	67
	5	41,5 (43,6)	CAMINHÃO TRATOR + SEMI REBOQUE E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. E3E4E5 = conjunto de eixos em tandem triplo; carga máxima 25,5 ton. d12, d23 > 2,40 m 1,20 m < d34, d45 ≤ 2,40 m	2S3	74

Figura 79 - Veículos Teste utilizados no processo de calibração na rodovia

- Velocidade:

As velocidades de passagem dos veículos na seção teste foram definidas entre velocidades mais elevadas próximas à velocidade operacional da rodovia (em torno de 80 a 100km/h para veículos pesados) e velocidades mais baixas (entre 40 e 60km/h).

- Temperatura da Pista:

As passagens dos veículos de teste foram realizadas em diferentes horários durante o dia, variando desde temperaturas mais baixas no período da manhã (de 20 a 25°C) chegando até temperaturas mais elevadas durante o período da tarde (de 40 até 50°C).

- Carregamento:

Para a realização do processo de calibração foram utilizados os seguintes carregamentos para os veículos de teste: **Veículo 1** com PBT de 20,5 t e **Veículo 2** com PBT de 34,5 t.

A seguir nas Figura 80 e Figura 81 são apresentadas algumas características dos veículos de teste, os mesmos foram carregados com pesos conhecidos, ficando com PBT conforme descrito no item anterior.

Veículo 1 - Caminhão Trucado (3C): veículo com eixo dianteiro simples de rodas simples (ESRS) com capacidade máxima de 6,0t e um eixo em tandem duplo na carroceria, ou seja, dois eixos simples de rodas duplas em tandem com capacidade de 17,0t somando um PBT máximo de 23,0t. Neste veículo um dos eixos traseiros recebe a força de tração do motor.



Figura 80 – Veículo de Teste 1: Caminhão Trucado (3C)

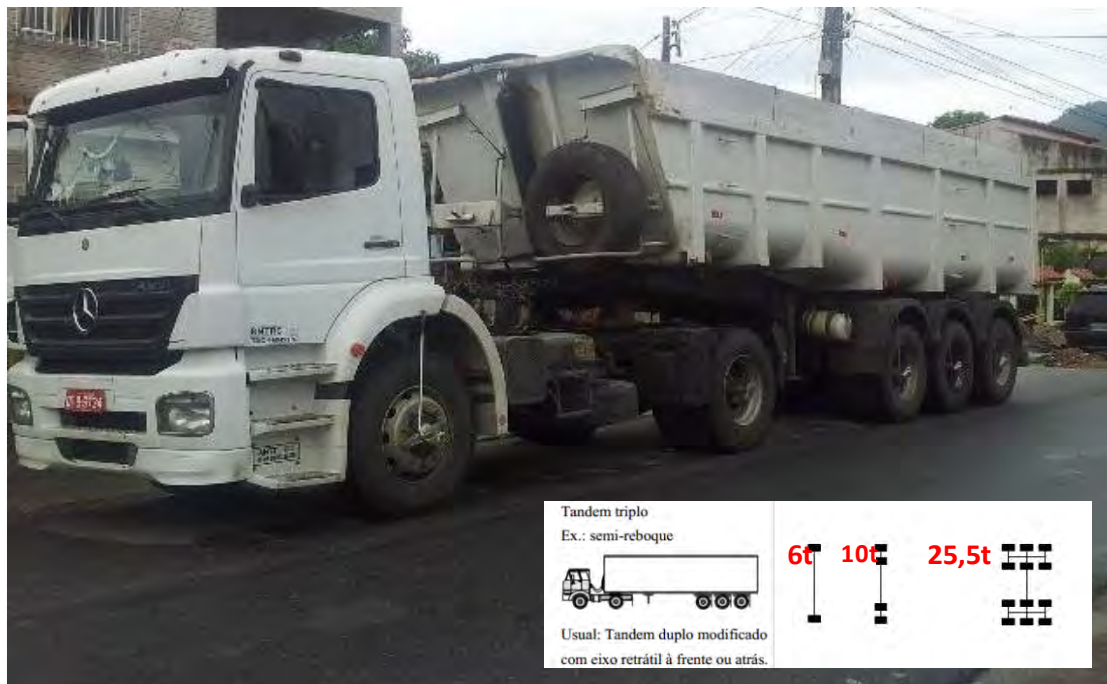


Figura 81 – Veículo de Teste 2: Caminhão Trator+Semi-Reboque (2S3)

Veículo 2 – Caminhão trator + Semi-Reboque (2S3): é uma categoria em que uma parte possui a força motriz (motor), rodas de tração e a cabine do motorista e a outra parte recebe a carga (Caminhão trator). A parte motriz pode ser acoplado a diferentes tipos de módulos de carga, chamados de semi-reboques. No caso em questão foi utilizado um veículo que utiliza um caminhão trator simples (dois eixos) e semi-reboque com três eixos (tandem triplo). Esta composição possui um PBT de 41,5t e comprimento máximo de 18,15 metros.

6.4.3 Processo de calibração

A realização dos testes foi efetuada no dia 28/02/13 com acompanhamento de diversas equipes técnicas, da quais podem ser citadas as equipes de apoio logístico e de TI da CONCEPA (Concessionária que administra a Rodovia), equipe de engenharia da PRIME Engenharia e Consultoria além de apoio técnico de representantes da empresa fabricante do equipamento WIM (TDC) e sua representante (TRACEVIA).

Foram realizadas diversas baterias de testes com o intuito de avaliar a operacionalidade e a consistência do sistema instalado nas duas faixas da rodovia. Os testes realizados durante o processo de calibração foram programados para abranger corridas de teste a diferentes velocidades, temperaturas e carregamentos, sendo que tais velocidades e carregamentos procuram refletir as condições operacionais (Figura 82, 83 e 84).

A coleta de dados nos testes controlados seguiu um conjunto de parâmetros e especificações geradas pela equipe técnica para permitir a verificação em profundidade do comportamento do hardware e do software incorporados nos sensores e sistemas.

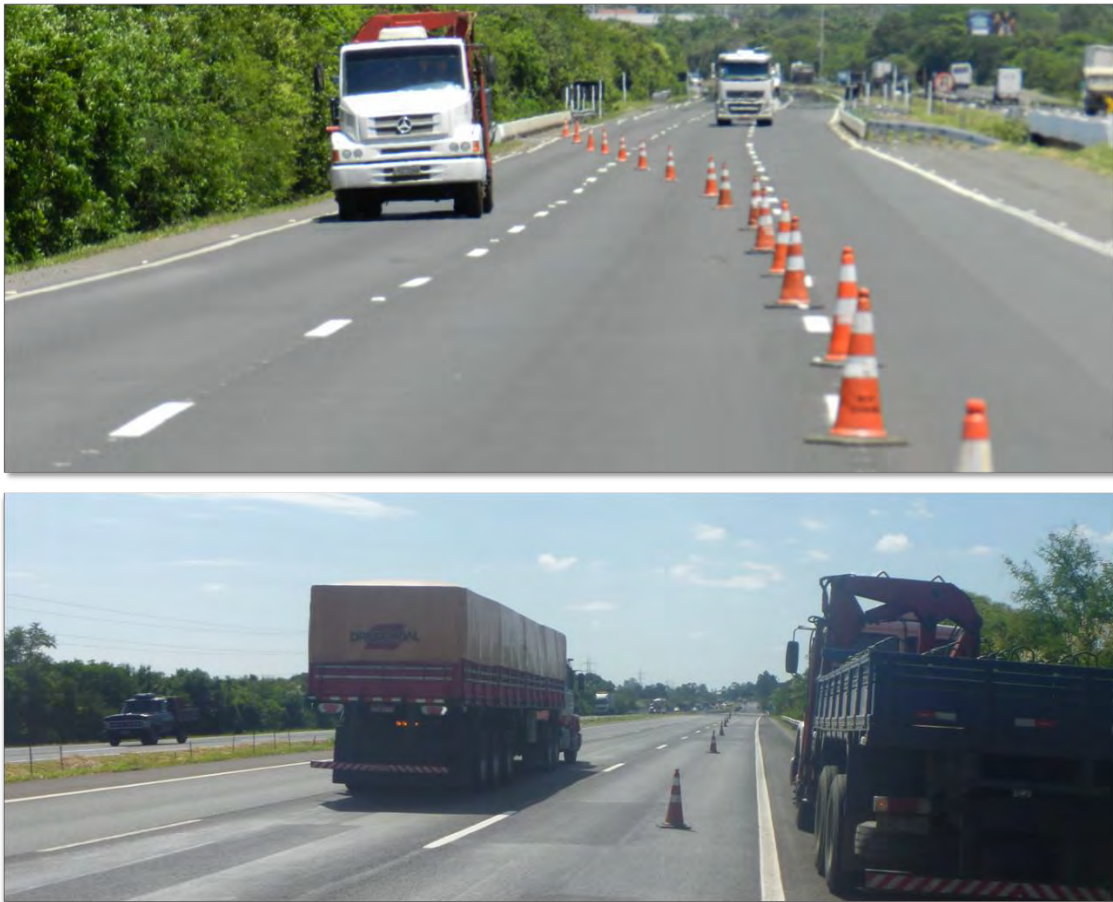


Figura 82 – Sinalização da pista para realização dos testes na rodovia



Figura 83 – Desvio do tráfego da rodovia para a realização dos testes de pesagem



Figura 84 – Preparação da pista para realização dos testes com o **Veículo 1 (3C)**

Para a realização das sucessivas passagens do **Veículo 1 (3C)** foi necessário o fechamento das duas faixas (Faixa 2 e Faixa 3 da Pista Sul) nas quais estão instalados os sensores por uma distância de aproximadamente 2km.

Essa distância foi necessária para que o veículo conseguisse atingir as velocidades requeridas para os testes no local onde estão instalados os sensores, e posteriormente para que tivesse uma distância de desaceleração segura.

Na imagem da Figura 85 é apresentada a aproximação do veículo de teste para a realização dos testes. Foram realizadas passagens sucessivas variando, além dos fatores já mencionados anteriormente, o distanciamento do rodado do veículo do limite da faixa, seguindo além da trilha de roda do tráfego atuante na rodovia, trilhas deslocadas para os extremos da faixa de rolamento para verificar a homogeneidade dos dados ao longo do comprimento dos sensores.



Figura 85- Momento da passagem do **Veículo 1 {3C}** na seção de teste

A aproximação do segundo veículo de testes (2S3) é demonstrada na Figura 86. Para a realização dos testes com este tipo de veículo, o mesmo foi instruído a realizar seu trajeto em forma de *loop* iniciando seu trajeto na Pista Sul a uma distância maior do que o veículo prime@primengenharia.com



anterior, para que pudesse atingir a velocidade requerida.

Após passar pela seção de teste o veículo fazia um retorno pela Pista Norte da rodovia, para posteriormente entrar na área de testes (área sinalizada com o desvio do tráfego da rodovia) já com uma velocidade considerável para atingir a velocidade estabelecida ao passar pelos sensores de pesagem em movimento.



Figura 86 – Aproximação e pesagem do **Veículo 2 (2S3)** na seção de teste

Na Figura 87 é apresentada uma imagem em que são realizados testes de calibração nas duas faixas com sensores WIM instalados. Ocorre a aproximação dos dois veículos de teste, 2S2 e 3C, com as duas faixas livres, isoladas do tráfego da rodovia que foi desviado para a faixa rápida.



Dessa forma, com sucessivas passagens destes dois veículos de testes a diferentes velocidades e diferentes temperaturas do pavimento (em função da variação de temperatura durante o dia) foi realizada a calibração dos sensores piezelétricos instalados nas faixas 3 e 2 da rodovia.



Figura 87 – Aproximação simultânea dos dois veículos de teste para pesagem em movimento na velocidade diretriz da rodovia



Figura 88 – Visão ampliada das condições da rodovia na seção de teste



6.4.4 Resultados do processo de calibração

O sistema WIM instalado, tanto na pista experimental do LAPAV/UFRGS quanto na rodovia BR-290/RS é classificado como sendo do Tipo I de acordo com a normatização ASTM E1318-02. Segundo descrição da norma os sistemas do Tipo I apresentam as seguintes características:

Tipo I: os sistemas instalados em rodovias de um ou mais pistas tem finalidade de contagem e classificação de veículos. Armazena as seguintes informações: carga por roda, carga por eixo, carga por grupo de eixo, peso bruto total, velocidade, espaçamento entre eixos, classe do veículo, identificação do posto, pista sentido e direção, data e hora, número sequencial de registro, distância entre eixos (+ distantes) e ESAL.

A acurácia dos sistemas WIM depende fundamentalmente de quatro principais fatores, sendo eles: dinâmica do veículo; integridade, composição e projeto do pavimento; variância inerente no sistema WIM e calibração.

A calibração, objeto do presente item, é o processo no qual são verificadas as conformidades do sistema instalado com os requisitos apresentados a seguir de acordo com a especificação normativa.

Na Tabela 10 a seguir são apresentados os requisitos de desempenho funcional dos sistemas WIM conforme definidos pela ASTM (ASTM E1318-02, 2002).

Tabela 10 – Requisitos de desempenho de sistemas WIM (ASTM E1318-02, 2002)

Função	Tolerância (95% de probabilidade)				
	Tipo I	Tipo II	Tipo III	Tipo IV	
				Kg	±Kg
Carga por roda	± 25%	-	± 20%	2300	± 100
Carga por eixo	± 20%	± 30%	± 15%	5400	± 200
Carga por grupo de eixos	± 15%	± 20%	± 10%	11300	± 500
Peso bruto	± 10%	± 15%	± 6%	27000	± 1100
Velocidade	± 2 km/h				
Espaçamento entre eixos	± 0,15 m				

Na calibração do sistema instalado na rodovia foram realizados diversos testes conforme especificado nos itens anteriores, com cargas conhecidas para aferição tanto do equipamento quanto da influência da temperatura do pavimento nas leituras realizadas (curva de temperatura).

Neste processo foram atingidos os valores estipulados nas tabelas acima quanto aos limites de aceitação e confiabilidade especificados pelo fabricante. Os valores das leituras realizadas após a calibração do sistema ficaram significativamente inferiores aos requisitos de desempenho estipulados pela ASTM E1318-02, 2002 para equipamentos WIM.

6.5 RESULTADOS – DETERMINAÇÃO DO ESPECTRO DE CARGAS

Após o sistema instalado e já se encontrando totalmente funcional, a coleta de dados foi realizada ininterruptamente. O sistema foi instalado próximo a um pórtico contendo painel de mensagem variável (Figura 89) o que permitiu conexão com o sistema de banco de dados da Concessionária diretamente através de fibra ótica.



Figura 89 – Local de instalação do sistema de pesagem em movimento

Na Figura 90 é apresentada uma visão geral da seção de testes, com o pórtico no qual ficam instalados os sistemas de aquisição e transmissão de dados e videomonitoramento. Foi também instalado junto ao PMV do km72 da Pista Sul da Rodovia uma câmera que permite o acompanhamento do sistema. Isto é muito importante pois viabiliza a certificação de uma adequada classificação do sistema.

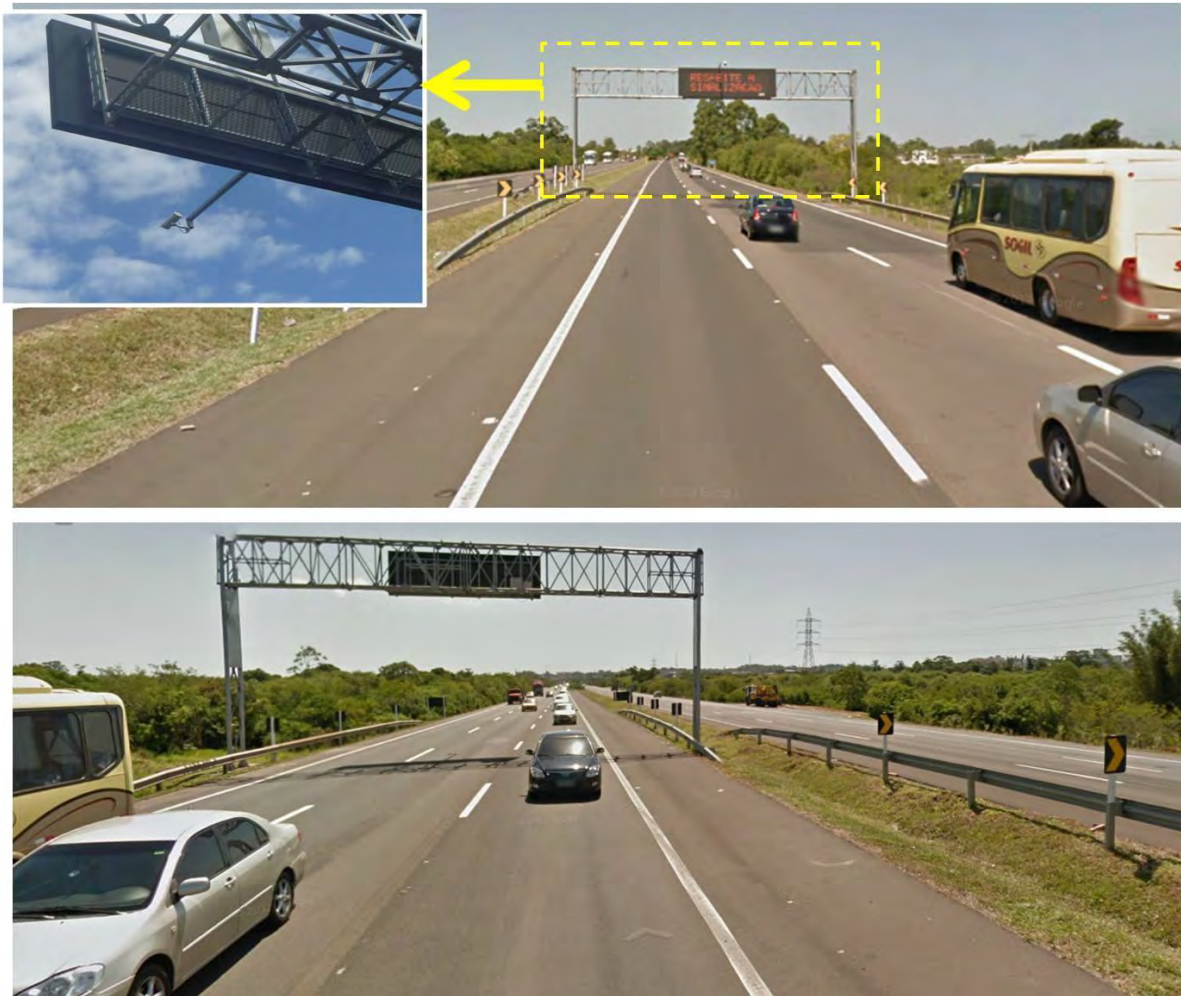


Figura 90 – Visão geral da seção de testes

A parte relativa à Tecnologia de Informação é uma grande barreira nestes sistemas que foi poupado de ser descrito em detalhe nesta pesquisa - já que foge ao seu escopo - mas que sem ela o projeto não seria possível de sobremaneira.

Houve um grande envolvimento do departamento de TI da Concepa para que fosse viável a implantação deste sistema, debruçando seus técnicos e equipe administrativa para tornar viável a implantação de um sistema já gerenciado. Isto permite que a coleta de dados ocorra automaticamente e com segurança dos dados do Data Center da Concessionária.

6.5.1 Acesso Remoto ao Banco de Dados do Monitoramento

Conforme mencionado anteriormente, foi desenvolvido um sistema pelo Departamento de Tecnologia de Informação da própria Concessionária capaz de armazenar os dados obtidos do sistema de Pesagem em Movimento de forma *online*.

Importante relatar que durante a visita à fabricante na Inglaterra durante a visita técnica efetuada, ficou evidente que a tecnologia desenvolvida na Concepa está bastante além dos sistemas lá existentes. Existe ainda um entrave de confiabilidade nos sistemas de tráfego



deste tipo de dado que fazem com as velocidades de conexão e interface de usuário sejam bastante menos amigáveis na Inglaterra em relação ao sistema aqui desenvolvido. A Figura 91 ilustra a tela de boas vindas ao sistema de exportação do fluxo de veículos do sistema de Pesagem instalado na BR-290, Freeway.

O sistema permite a escolha da data inicial e final a ser consultada e gera automaticamente um arquivo de dados no qual é possível de qualquer lugar acessar os dados e fazer as análises necessárias. Isto facilita grandemente os acessos das equipes consultivas e estima-se que isto permitirá um fluxo contínuo de análises dos dados de pesagem dos veículos que hoje trafegam na rodovia.

Conforme será descrito no item a seguir, é possível a partir de um sistema disponibilizado *online* da Concessionária exportar o fluxo de veículos com sua classificação e pesagem já obtida, contendo todos os parâmetros necessários conforme mostra a representação esquemática a seguir.

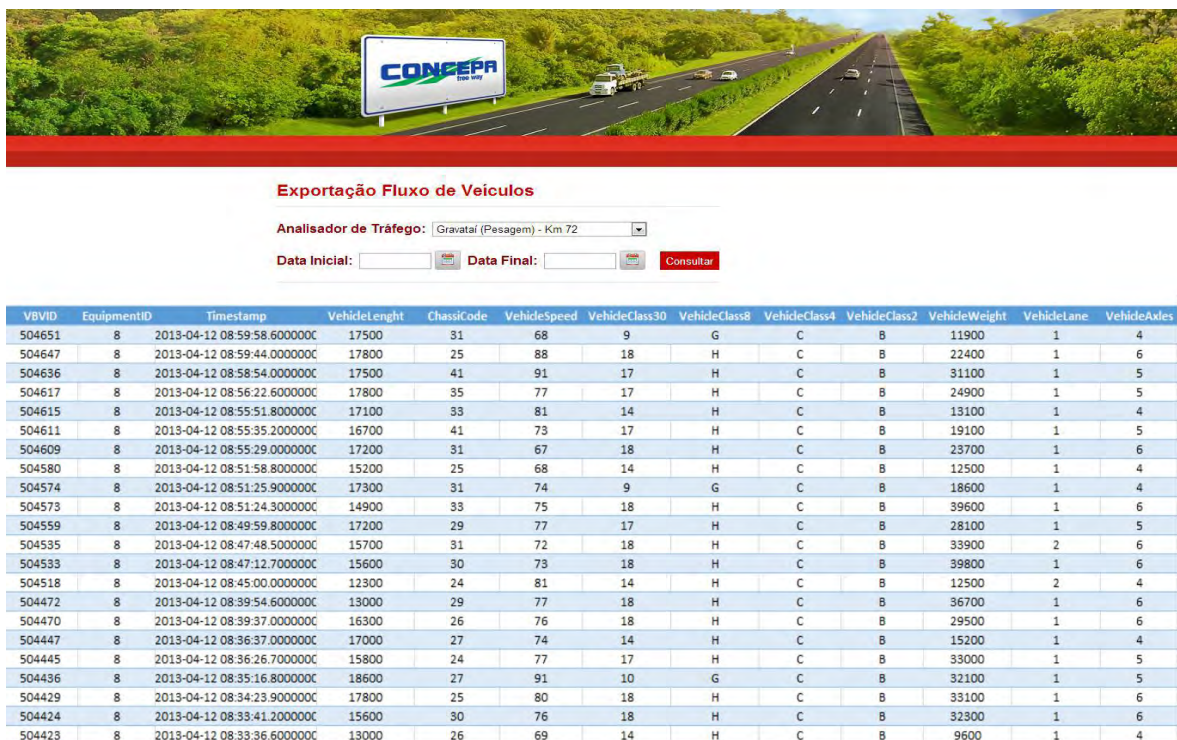


Figura 91 - Tela do software online de acesso remoto ao sistema de pesagem WIM implantando na Rodovia BR-290/RS – Freeway e formato dos dados exportados

6.5.2 Análise do banco de dados formado durante o período de monitoramento (13/03/13 até 15/04/13)

Conforme objetivo da presente pesquisa que visa o Estudo do Espectro de Cargas dos Veículos Comerciais rodantes na BR-290/RS, Freeway, através do uso da técnica do Weigh-in-Motion (WIM) caracterizado pela implantação de um sistema de pesagem em movimento, será apresentado a partir deste item a forma de aquisição e a análise dos resultados obtidos no período de monitoramento do tráfego.



Este estudo irá promover adicionalmente a modernização da infraestrutura pela inserção de uma nova tecnologia de pesagem (pesagem seletiva), visando à melhoria da eficiência e produtividade da malha da Concessionária, por agir com uma ferramenta de análise dos eixos de carga que rodam sobre a rodovia, facilitando, também, estudos futuros no segmento da durabilidade dos pavimentos e, ainda, constituindo uma ferramenta de apoio à coibição dos excessos de carga futuramente.

Na Figura 92 é apresentada uma tela com os principais dados adquiridos pelo sistema de WIM, os quais compõe o banco de dados referente ao monitoramento do tráfego da rodovia. Os dados de pesagem podem ser acessados em tempo real pela Concessionária, inclusive com monitoramento de vídeo conforme mostrado anteriormente e também são coletados da plataforma de armazenamento no final de cada dia e disponibilizados de forma online para serem de fácil acesso.

Método 1							Método 2		
VBVID	EquipmentID	Timestamp	VehicleLength	ChassiCode	VehicleSpeed	VehicleClass30	VehicleWeight	VehicleLane	VehicleAxles
224429	8	2013-03-20 00:00:12.6000000	18200	32	74	14	20200	1	4
224430	8	2013-03-20 00:00:18.1000000	3700	4	92	3	430	2	2
224431	8	2013-03-20 00:00:43.0000000	4100	63	82	3	750	2	2
224432	8	2013-03-20 00:01:45.9000000	9800	29	78	7	8600	2	3
224433	8	2013-03-20 00:02:06.1000000	4100	72	130	3	930	2	2
224434	8	2013-03-20 00:02:44.2000000	4000	81	96	3	960	2	2
224435	8	2013-03-20 00:02:46.4000000	3900	64	74	3	480	2	2
224436	8	2013-03-20 00:03:03.5000000	5700	22	82	4	4070	2	2
224437	8	2013-03-20 00:03:11.8000000	4400	70	105	3	1040	2	2
224438	8	2013-03-20 00:03:31.7000000	5700	60	86	4	2300	2	2
224439	8	2013-03-20 00:03:36.9000000	4200	35	101	4	1230	2	2
224440	8	2013-03-20 00:03:55.9000000	4000	75	91	3	1220	2	2
224441	8	2013-03-20 00:03:58.1000000	17500	27	76	17	17400	1	5
224442	8	2013-03-20 00:04:33.5000000	17500	23	77	14	10300	1	4
224443	8	2013-03-20 00:04:37.5000000	4200	70	81	3	820	2	2
224444	8	2013-03-20 00:05:14.6000000	15100	39	96	17	22000	2	5
224445	8	2013-03-20 00:05:48.3000000	4500	55	84	3	740	1	2
224446	8	2013-03-20 00:06:02.8000000	4500	64	78	3	980	2	2
224447	8	2013-03-20 00:06:23.6000000	15900	30	72	9	15100	2	4
224448	8	2013-03-20 00:06:32.3000000	4000	76	83	3	1010	2	2
224449	8	2013-03-20 00:06:38.3000000	4200	73	85	3	1010	2	2
224450	8	2013-03-20 00:06:44.8000000	9100	25	62	7	13500	1	3
224451	8	2013-03-20 00:07:31.0000000	4300	50	99	3	2060	2	2
224452	8	2013-03-20 00:07:54.7000000	3700	3	62	3	3070	1	2
224453	8	2013-03-20 00:07:55.3000000	14700	8	78	18	10500	2	6
224454	8	2013-03-20 00:07:55.7000000	11300	0	77	17	8960	1	5
224455	8	2013-03-20 00:08:00.7000000	9300	23	69	7	12000	1	3

Figura 92 - Tela do banco de dados levantados com principais dados adquiridos

6.5.3 Metodologia 1 – Classificação Default do software

Para a análise dos dados, no presente momento, foram utilizados dois métodos de classificação e agrupamento dos dados. Para o Método 1 utiliza-se de uma das classificações de veículos disponível no próprio equipamento, ou seja, uma classificação *default* (UK NCC 30). Na representação da Figura 93 são apresentadas as classes de veículos utilizadas pelo método, Classe 1 à 26 conforme silhuetas a seguir.

Dados do espectro de cargas resultantes do período composto por 5 semanas de coleta de dados, após a realização de uma filtragem para excluir veículos leves com dois eixos, mantendo somente os veículos de carga (segundo classificação UK NCC 30 – foram excluídas das análises as seguintes classes fornecidas pelo *default* do equipamento: VehicleClass30: Classe 1, Classe 2, Classe 3, Classe 4 e Classe 5, conforme assinalado na figura acima, além disso, também foram excluídos da análise as classes 22 a 26 – as quais não apresentavam contagem de dados).











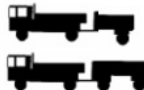










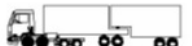
Classificação UK NCC 30	Descrição	Silhueta
1	Bicicleta	
2	Motocicleta	
3	Automóveis	
4	Utilitário	
5	Automóvel com reboque 1 ou 2 eixos	
6	Caminhão rígido c/2 eixos	
7	Caminhão rígido c/3 eixos	
8	Caminhão rígido c/4 eixos	
9	Caminhão rígido c/2 eixos + reboque c/ 1 ou 2 eixos	
10	Caminhão rígido c/2 eixos + reboque c/ 3 eixos	
11	Caminhão rígido c/3 eixos + reboque com 2 eixos	
12	Caminhão rígido c/3 eixos + reboque com 3 eixos	
13	Trator c/2 eixos + semi-reboque c/1 eixo	
14	Trator c/2 eixos + semi-reboque c/2 eixos	
15	Trator c/3 eixos + semi-reboque c/1 eixo	
16	Trator c/3 eixos + semi-reboque c/2 eixos	
17	Trator c/2 eixos + semi-reboque c/3 eixos	
18	Trator c/3 eixos + semi-reboque c/3 eixos	
19	Ônibus com 2 ou 3 eixos	
20	Veículo c/ 7 eixos ou mais	
22	Veículo c/ 2 eixos sem outra classificação	
23	Veículo c/ 3 eixos sem outra classificação	
24	Veículo c/ 4 eixos sem outra classificação	
25	Veículo c/ 5 eixos sem outra classificação	
26	Veículo c/ 6 eixos sem outra classificação	
21	Veículo só c/ 1 eixo contado	Problema na Classificação Acúmulo de outras classes

Figura 93 – Representação esquemática da composição do espectro de cargas segundo a classificação disponibilizada no equipamento (UK NCC 30)



6.5.4 Metodologia 2 – Classificação em função da quantidade de eixos e do distanciamento entre eixos dos veículos comerciais (DNIT)

Por tratar-se de uma tecnologia nova e ainda fase inicial de implantação no país, o fabricante ainda não possui no software a possibilidade do agrupamento do espectro de cargas conforme classificação vigente no país. Em função do exíguo período desta pesquisa não foi possível implementar diretamente no equipamento um modelo de classificação nacional para agrupamento dos dados, espera-se realizar esta etapa no futuro, em que os dados armazenados no banco de dados já estejam agrupados segundo classificação do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT.

Nesta segunda metodologia utilizou-se simplesmente o agrupamento dos veículos em função do número de eixos. Os dados utilizados estão destacados na imagem da Figura 92 e aqui apresentados de forma mais detalhada nos gráficos com os principais resultados obtidos no decorrer do período de monitoramento.

Na Figura 94 está apresentada de forma esquemática a metodologia de classificação dos veículos com os principais dados disponíveis (número de eixos e distanciamento entre eixos). Com a utilização destes dados foi possível realizar a classificação dos veículos monitorados no período de 5 semanas e posterior definição do espectro de cargas conforme será apresentado a seguir.

O banco de dados analisado corresponde ao período de coleta de dados de 13/04/13 a 15/04/13, totalizando um montante de 107.387 veículos comerciais monitorados nas duas faixas em que se encontram instalados os sensores WIM.

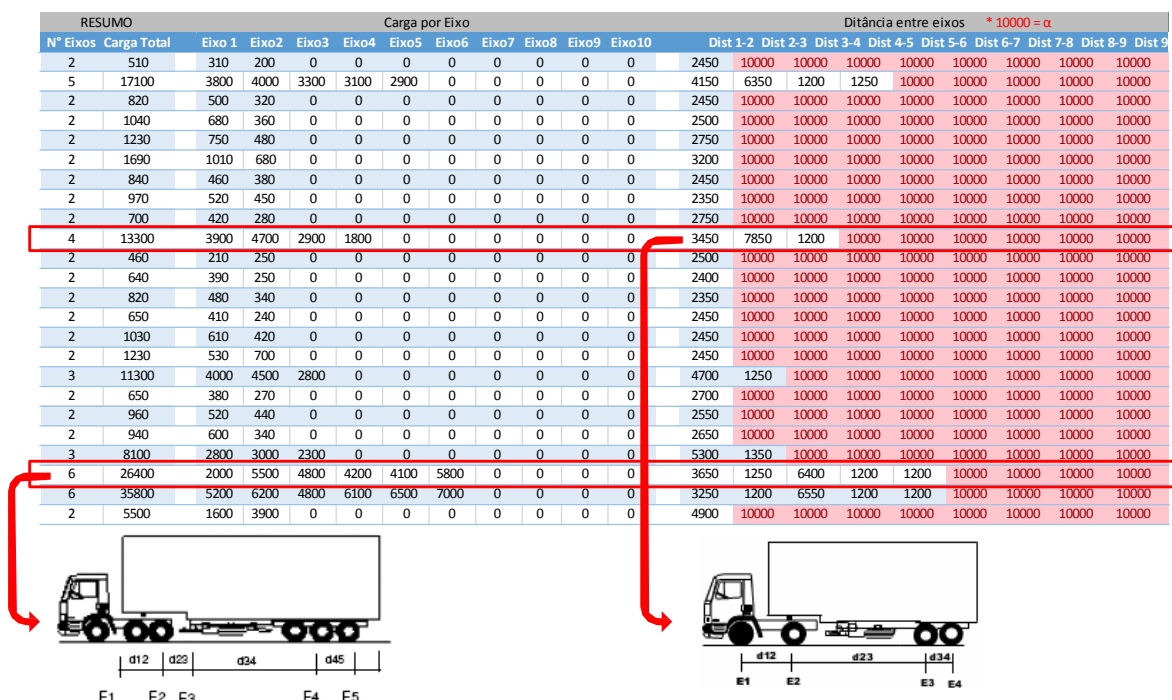


Figura 94 – Representação da classificação dos veículos comerciais em função da quantidade de eixos e distanciamento entre os mesmos



6.5.5 Comparativo entre as duas metodologias

Pode-se notar que a Metodologia 1 apresenta algumas falhas na classificação, como pode ser visto no percentual de veículos não classificados (**15,3%**). Ao analisar mais detalhadamente os dados, a maioria dos veículos classificados desta forma não apresentam problemas nas leituras fornecidas pelos sensores, os mesmos apresentam leituras de peso total, peso por eixo e distanciamento entre os eixos.

Ao constatar este fato, foi realizada uma análise alternativa dos dados, Metodologia 2 mencionada anteriormente, para enquadrar as leituras que não foram corretamente enquadradas na presente metodologia e que representam um percentual bastante significativo das amostras analisadas.

Os dados abaixo (Figura 95) correspondem a primeira semana de monitoramento, em que é exemplificada a filtragem de dados realizada para desconsiderar os veículos leves na classe correspondente aos veículos com dois eixos, considerando apenas os veículos comerciais de carga. Os veículos estão agrupados por número de eixos correspondentes.

Veículos leves com 2 eixos								
Classe 1	0		2 eixos	5546	24,78%	2 eixos	22,94%	1,85%
Classe 2	319		3 eixos	6183	27,63%	3 eixos	23,16%	4,47%
Classe 3	47344		4 eixos	3003	13,42%	4 eixos	12,59%	0,83%
Classe 4	5082		5 eixos	3111	13,90%	5 eixos	13,59%	0,32%
Classe 5	531		6 eixos	3403	15,21%	6 eixos	12,85%	2,36%
Total	53276		7 eixos	786	3,51%	7 eixos	0,00%	3,51%
			8 eixos	27	0,12%	8 eixos	0,00%	0,12%
Total	53276		9 eixos	319	1,43%	9 eixos	0,00%	1,43%
Total Veíc. 2 eixos	58822		10 eixos	0	0,00%	10 eixos	0,00%	0,00%
Tot. - Leves	5546		S/ Class.	0	0,00%	S/ Class.	14,87%	14,873%
			Total	22378	100,00%	Total	100,0%	

Figura 95 – Análise Semana 1: Filtragem de veículos leves e comparativo entre as duas metodologias de classificação utilizadas

Nota-se que praticamente todo o percentual de veículos não classificados pela Metodologia 1 é diluído em outras classes, principalmente nas classes com 2 e 3 eixos e com mais de 6 eixos (classes estas que não apresentavam nenhuma ocorrência), quando se realiza a análise conforme Metodologia 2.



6.5.6 Espectro de cargas - RESULTADOS

Após análise do banco de dados coletado no período de 5 semanas de monitoramento contínuo do tráfego na Pista Sul da Freeway através de um equipamento de WIM chegou-se a um panorama do espectro de cargas que trafega na rodovia.

Na tabela da Figura 96 são apresentados os resultados integrais do período de monitoramento, comparativo entre as duas metodologias e as diferenças quase que totalmente diluídas (os dados apresentam-se agrupados por número de eixos). Na Figura 97 é apresentado o espectro de cargas segundo a Metodologia 1 de análise, o espectro de cargas segundo a Metodologia 2 é apresentada na Figura 98.

Nº Eixos Classificação			Classificação UK NCC 30		Diferença
Nº Eixos	Nº Veículos	%	Nº Eixos	%	
2 eixos	27508	25,63%	2 eixos	23,31%	2,31%
3 eixos	30052	27,99%	3 eixos	23,38%	4,61%
4 eixos	13964	13,00%	4 eixos	12,14%	0,86%
5 eixos	14844	13,83%	5 eixos	13,52%	0,31%
6 eixos	15682	14,59%	6 eixos	12,38%	2,22%
7 eixos	3711	3,45%	7 eixos	0,00%	3,45%
8 eixos	127	0,12%	8 eixos	0,00%	0,12%
9 eixos	1498	1,39%	9 eixos	0,00%	1,39%
10 eixos	1	0,00%	10 eixos	0,00%	0,00%
S/ Class	0	0,00%	S/ Class	15,28%	
Total	107387	100%	Total	100%	14,97%

Figura 96 – Comparativo das duas metodologias para o grupo integral de dados

Classificação UK NCC 30	Descrição	Silhueta	Percentual
6	Caminhão rígido c/2 eixos		23,3 %
7	Caminhão rígido c/3 eixos		22,3%
8	Caminhão rígido c/4 eixos		1,1 %
9	Caminhão rígido c/2 eixos + reboque c/ 1 ou 2 eixos		5,3 %
10	Caminhão rígido c/2 eixos + reboque c/ 3 eixos		0,5 %
11	Caminhão rígido c/3 eixos + reboque com 2 eixos		0,8 %
12	Caminhão rígido c/3 eixos + reboque com 3 eixos		2,0 %
13	Trator c/2 eixos + semi-reboque c/1 eixo		1,1 %
14	Trator c/2 eixos + semi-reboque c/2 eixos		5,6 %
15	Trator c/3 eixos + semi-reboque c/1 eixo		0,1 %
16	Trator c/3 eixos + semi-reboque c/2 eixos		1,2 %
17	Trator c/2 eixos + semi-reboque c/3 eixos		11,1 %
18	Trator c/3 eixos + semi-reboque c/3 eixos		10,4 %
20	Veículo c/ 7 eixos ou mais		0,0 %
21	Veículo não classificado	-----	15,3%

Figura 97 – Espectro de cargas segundo classificação UK NCC 30 - default



N° eixos	Classificação	Silhueta	Percentual de veículos por classe (%)					
			Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 5	Total Período
2 eixos	2C		24,78	25,43	26,43	25,89	25,60	25,63
3 eixos	3C		24,97	25,50	25,11	24,62	25,30	25,10
	2S1		2,66	2,71	3,55	2,96	2,57	2,89
4 eixos	4C		0,21	0,20	0,23	0,19	0,30	0,23
	2S2		11,62	10,87	11,05	11,41	10,99	11,19
	2I2		0,57	0,62	0,65	0,51	0,60	0,59
	3S1		0,09	0,14	0,10	0,10	0,11	0,11
	2C2		0,93	0,89	0,89	0,87	0,87	0,89
5 eixos	2S3		11,08	11,25	11,03	11,31	11,21	11,18
	3S2		1,27	1,16	1,08	1,11	1,31	1,19
	2I1 2C3		0,21	0,15	0,16	0,17	0,25	0,19
	2I3		0,04	0,05	0,04	0,04	0,05	0,04
	3I2 3C2		1,30	1,27	1,10	1,20	1,32	1,24
6 eixos	3S3		12,57	12,04	11,68	12,08	11,83	12,04
	3I3		0,11	0,07	0,05	0,05	0,10	0,08
	2R4		0,20	0,14	0,14	0,13	0,14	0,15
	3C2 3I1		2,32	2,44	2,01	2,30	2,56	2,33
7 eixos / mais	-----		5,06	5,08	4,71	5,06	4,91	4,96

* Semana 1- 13/03 a 19/03; Semana 2- 20/03 a 26/03; Semana 3- 27/03 a 02/04; Semana 4- 03/04 a 09/04; Semana 5- 10/04 a 15/04

Figura 98 – Espectro de cargas em função do número de eixos e distanciamento (DNIT)



A partir do espectro de cargas encontrado, foi realizado um agrupamento de veículos com semelhante número de eixos. No gráfico da Figura 99 são apresentados os percentuais de veículos segundo as duas metodologias empregadas.

Nota-se aqui mais visivelmente a diluição da diferença proporcionada pela não classificação de um representativo grupo de dados pela classificação dada pelo equipamento (mais de 15%). Reitera-se dessa forma novamente a necessidade de implantação futura, na continuidade desta pesquisa, uma classificação nacional no próprio equipamento, sendo possível dessa forma gerar de forma direta o espectro de cargas.

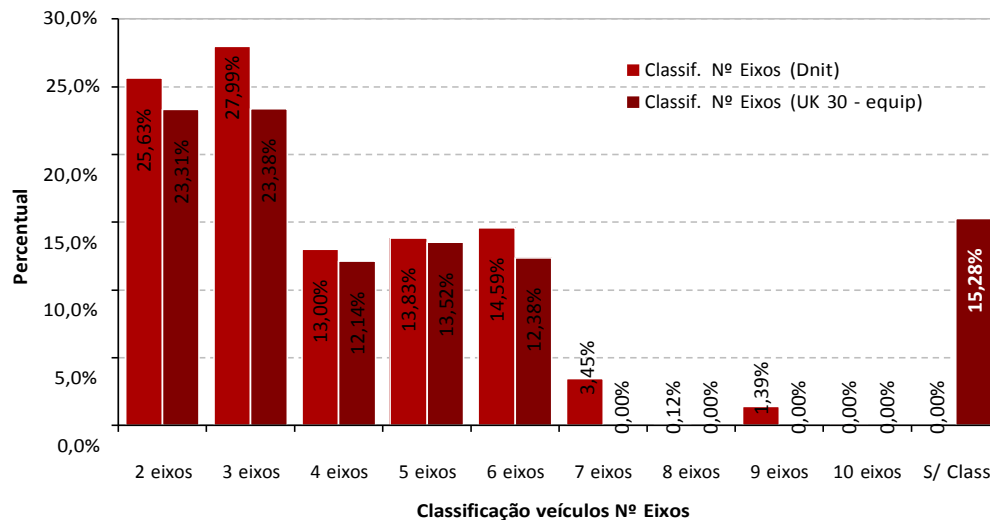


Figura 99 – Resultados comparativos para o grupo integral de dados – coleta contínua com veículos agrupados por número de eixos

Adicionalmente apresenta-se a seguir a distribuição normal das cargas de todo o espectro de cargas obtido no período de monitoramento (Figura 100).

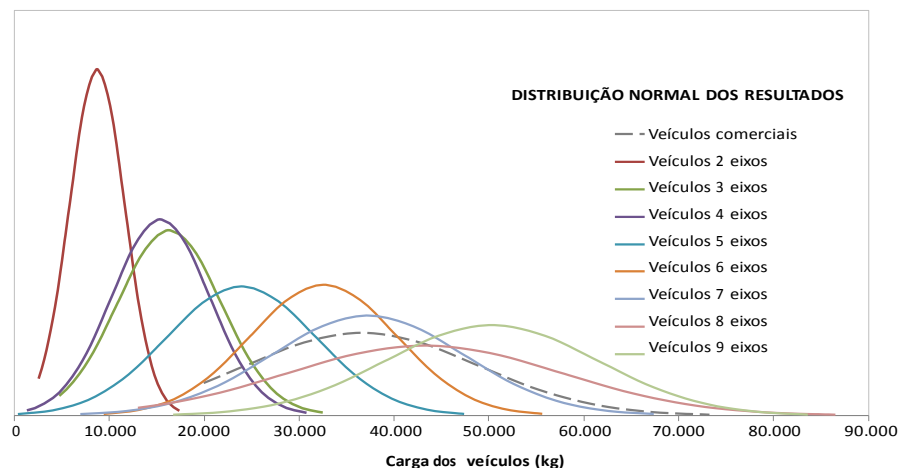


Figura 100 – Distribuição normal dos resultados

Dentre os dados do espectro de cargas obtido realizou-se uma verificação do carregamento dos veículos (percentual carga apresentado pelos veículos em função de sua capacidade máxima). Conforme apresentado na Figura 101 definiu-se o percentual de veículos com alguma sobrecarga em algum de seus eixos.

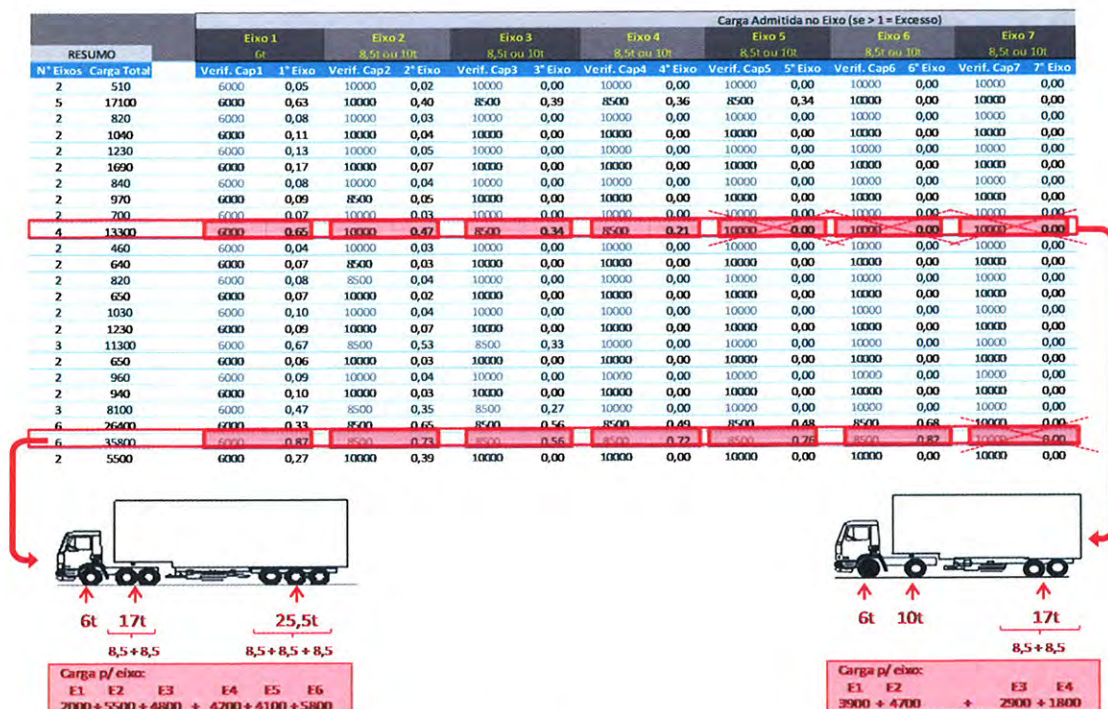


Figura 101 – Análise para definição do percentual de carregamento

Analisando todos os dados de carregamento por eixo dos veículos, chega-se aos seguintes percentuais de sobrecarga apresentados na Figura 102.

	1º Eixo	2º Eixo	3º Eixo	4º Eixo	5º Eixo	6º Eixo	7º Eixo	8º Eixo	9º Eixo	10º Eixo
A	447	745	224	221	237	173	12	2	5	0
B	2,08%	3,48%	1,05%	1,03%	1,10%	0,80%	0,06%	0,01%	0,02%	0,00%
C	12,93%	14,71%	12,37%	9,39%	9,94%	8,43%	10,85%	7,30%	7,23%	0,00%

RESUMO

107387	A: Total de veículos comerciais monitorados
9,63%	B: Percentual de veículos com alguma sobrecarga em algum eixo
9,31%	C: Percentual médio de sobrecarga na amostra total

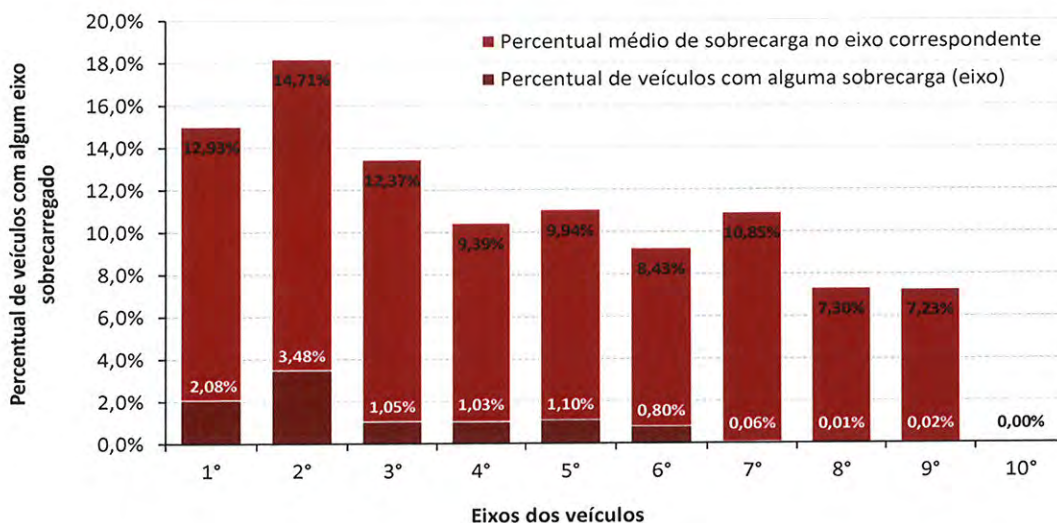


Figura 102 – Percentual de veículos com alguma sobrecarga em algum de seus eixos e percentual de sobrecarga neste eixo



7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

De acordo com os resultados obtidos na presente pesquisa, a qual é intitulada como “Estudo do Espectro de Cargas dos Veículos Comerciais rodantes na BR-290/RS, Freeway, através do uso da técnica do Weigh-in-Motion (WIM)”, atingiu-se com êxito o objetivo geral que consistia em estudar a composição do espectro de cargas da frota de veículos rodantes na Freeway.

No item “6.5 - Resultados e Determinação do Espectro de Cargas” são apresentados os dados e as metodologias de análise do banco de dados coletado durante um período de monitoramento de 5 semanas (13/03 a 15/04/2013), onde posteriormente no item “6.5.6 Espectro de cargas - RESULTADOS” é apresentado o espectro de cargas dos veículos comerciais da rodovia BR 290/RS segundo dados coletados no período de monitoramento anteriormente mencionado, atingindo-se dessa forma o objetivo geral proposto no projeto de pesquisa.

Conforme apresentado no item “6.5.2 e subitem 6.5.6” dentre o espectro de cargas obtido, fez-se o agrupamento de veículos por número de eixos, constatando-se que os dois maiores percentuais são referentes a veículos com 2 e 3 eixos (25,63% e 27,99% respectivamente). As demais composições, com 4 eixos 5 eixos e 6 eixos apresentam percentuais bastante semelhantes (por volta de 14%). Composições com mais de sete eixos são de menor ocorrência na frota analisada.

Além de definir o espectro de cargas, apresenta ainda a distribuição normal da carga dos veículos comerciais como um todo, e as distribuições normais de cargas para veículos com a mesma quantidade de eixos, nas quais se observa a dispersão das cargas em cada categoria (item 6.5.6 Espectro de cargas - RESULTADOS).

Para atingir com sucesso o objetivo geral da pesquisa e obter um panorama do espectro de cargas que atualmente trafega na rodovia foi necessário atingir uma série de objetivos específicos, os quais foram elencados no projeto e foram de extrema importância para o andamento da pesquisa, conforme descrito no item “1.2.2”.

De fundamental importância foi a etapa de coleta de informações disponíveis sobre os principais tipos de equipamentos disponíveis no mercado para pesagem em movimento apresentado no segundo capítulo do presente relatório “2. Revisão Bibliográfica sobre sistemas de pesagem”.

Foi realizado um amplo levantamento em fontes internacionais e nacionais visando a escolha pela melhor tecnologia disponível para o caso específico desta pesquisa, um equipamento que atendesse as necessidades do projeto para atingir os objetivos propostos, ou seja, aquisição e implantação do equipamento em um intervalo relativamente curto e início de coleta de dados durante um período proposto.

A escolha do equipamento foi baseada nas informações levantadas e nas características dos sistemas disponíveis referentes a acurácia, confiabilidade do sistema e facilidade de instalação. Tinha-se a necessidade de um sistema que apresentasse características mínimas de precisão e operação que permitiria coletar dados para a determinação do espectro de cargas na rodovia BR-290/RS no trecho da Freeway, com a melhor confiabilidade disponível.



A tecnologia com maior potencial para ser utilizada demonstrou ser a de sensores piezoelétricos que de acordo com a revisão bibliográfica se apresentava com maior potencial de uso em função de sua precisão, disponibilidade, acurácia e aplicabilidade em pavimentos asfálticos típicos do Brasil.

O sistema de WIM que se mostrou de potencial uso foi sem dúvida de acordo com a literatura a configuração de equipamento chamado "Piezo+Loop+Piezo". A instalação de um loop magnético entre os sensores WIM utilizados - no caso piezoelétricos - é necessário para que seja feito a classificação dos veículos. O sistema de WIM com uso de duas linhas de sensores piezoelétricos mais um loop magnético é o que se pode considerar hoje como uma instalação padrão e retorna resultados positivos e adequados para o propósito da pesquisa - Estudo de Espectro de Cargas da rodovia BR-290/RS, Freeway (Capítulo 4 Escolha do Sistema de WIM para Implantação).

A visita realizada à Inglaterra foi extremamente produtiva tendo sido de grande valia para validar a TDC como um fornecedor do equipamento, saber das características do equipamento em detalhe, melhor compreender o uso dos sistemas WIM do ponto de vista da Agência Reguladora VOSA e, principalmente, perceber que o rumo da pesquisa havia sido acertado e encontrava-se em um caminho promissor (Capítulo 4, itens 4.3, 4.4 e 4.5).

A concessionária auxiliou na aquisição dos equipamentos e fez consulta à ANTT, conforme solicitado na carta de aprovação desta pesquisa, para aquisição dos equipamentos utilizados do desenvolvimento do estudo. A aquisição foi feita com base nas recomendações obtidas na primeira parte deste estudo onde se pode fazer a recomendação para compra de um sistema Piezo+Loop+Piezo com duas linhas de sensor em adição aos equipamentos necessários à instalação no Simulador de Tráfego LAPAV/UFRGS.

Após a aquisição do equipamento e prosseguimento da pesquisa foi realizada a validação do equipamento nos aspectos técnicos e operacionais através de sua instalação em uma pista experimental solicitada pelo Simulador de Tráfego do Laboratório de Pavimentação LAPAV/UFRGS foi âncora fundamental para a instalação adequada em campo, permitindo um treinamento antecipado da equipe e conhecimento das propriedades do sistema.

A implantação experimental do sistema WIM na Área de Pesquisa e Testes em Pavimentos - LAPAV/UFRGS permitiu que o sistema fosse objeto de estudo para uma implantação acurada no que se refere à sua instalação física para melhor funcionamento, e também calibração do sistema através do uso de um Simulador de Tráfego, através do qual foram aplicadas cargas em movimentos (cargas e velocidade predefinidas) para ajuste dos sensores e hardware de aquisição de dados (Capítulo 5 Implantação WIM na Pista Experimental LAPAV/UFRGS).

Para aquisição dos dados e determinação do espectro de cargas foi discutida a localização exata para a instalação do equipamento juntamente com os técnicos da Concessionária, onde foi definido como sendo o local mais apropriado para instalação do Sistema WIM as proximidades do km72 (pista sul - sentido Porto Alegre - Osório) da rodovia BR-290/RS Freeway.

Este local foi definido em função de variáveis como adaptabilidade ao sistema de tecnologia da Concessionária, tipo de acabamento do pavimento, proximidade operacional



do posto de PRF no km70 e proximidade do Posto de Pesagem móvel do km65 com presença de uma balança fixa para eventuais verificações de cargas teste utilizadas na calibração dos sensores e também posteriormente, no futuro, executar verificações e/ou auxiliar em atuações de veículos que trafegam com excesso de carga (Capítulo 6 Instalação onsite do Sistema WIM - BR 290/RS Freeway).

No que se refere à metodologia para armazenamento de tráfego, vários testes foram realizados. Hoje a Concessionária trafega com os dados diretamente na sua rede de dados por fibra ótica sendo possível a coleta de dados em seus servidores SQL de forma online. Há dois tipos de coleta realizadas que são consolidadas; uma ocorre em tempo real do sistema e outra que consulta do banco de dados guardado no equipamento em intervalos de uma hora. Esta segunda maneira de coletar o dado garante a redundância de dado com vistas a não se perderem resultados em caso de qualquer pane ou congestionamento no tráfego de dados até o servidor, garantindo a confiabilidade necessária ao sistema.

Restaram várias opções de estudos futuros ainda não conhecidos. Um deles refere-se a como fazer o armazenamento da grande massa de dados. Como o período de coletas foi pouco superior a um mês não houve qualquer dificuldade em armazená-lo e a Concessionária desenvolveu em parceria com a equipe de trabalho desta pesquisa um software de recuperação de dados online que permite consulta integrada dos dados coletados após a realização de um dia de dados em qualquer intervalo de tempo. Estima-se que há necessidade de se fazerem estudos adicionais para recomendação da sistemática estatística de como guardar os dados. Mas isto só poderá ocorrer após ser possível de programar o sistema para coleta de dados conforme os padrões DNIT que ainda não foi possível de se realizar dentro do escopo desta pesquisa, e que a mesma não se propunha.

Com o equipamento instalado, totalmente funcional e restando somente a etapa de coleta e análise dos dados, deu-se início após a calibração do sistema o armazenamento de informações do tráfego atuante na seção de teste da rodovia.

Atingiu-se com esta etapa o objetivo geral da presente pesquisa, conforme mencionado no início deste capítulo, ou seja, a determinação de um panorama do espectro de carga atuante na rodovia com 5 semanas de coleta de dados.

Além de atingir os objetivos propostos, tanto geral quanto específicos, ainda foi possível definir um panorama referente ao sobrepeso dos veículos comerciais monitorados. Foi constatado que, durante o período de coleta de dados, do total de veículos monitorados (107387 veículos) 9,63% apresentavam alguma sobrecarga em algum eixo, sendo que o maior percentual de sobrecarga ocorreu no segundo eixo (3,48% dos veículos apresentaram uma sobrecarga média de 14,7% neste eixo). Outro fato importante a ser destacado foi a segunda maior sobrecarga, sendo esta encontrada no primeiro eixo (2,08% dos veículos apresentaram uma sobrecarga média de 12,93% neste eixo). Cabe ressaltar que a sobrecarga no primeiro eixo é mais crítica para o pavimento, pois apresenta em sua configuração apenas dois pneumáticos (ESRS), fato este que acaba concentrando as cargas de maneiras mais significativas (maior concentração de carga por pneumático).

Os dados obtidos foram analisados por equipe de consultores externos – Prof. Jorge Ceratti e Prof. Washington Núñez para comentários sobre as análises realizadas com o propósito de validar o estudo realizado dado sua expertise nesta área do conhecimento. O Anexo 1 a



seguir mostra os comentários realizados mostrando que os dados estão dentro do esperado pelo conhecimento que se tem acesso na literatura nacional com especial atenção à tecnologia do WIM ter demonstrado ser eficaz na determinação do espectro de cargas.

Por fim, ressalta-se que há uma série de oportunidades que esta pesquisa abre e que deve ser explorada futuramente para investigação desta ferramenta tanto no que se refere como um instrumento para uso na gerência de pavimentos, como atualização de dados sobre a frota brasileira e também como um mecanismo de fiscalização e controle em auxílio às balanças de pesagem fixa e móveis hoje existentes.



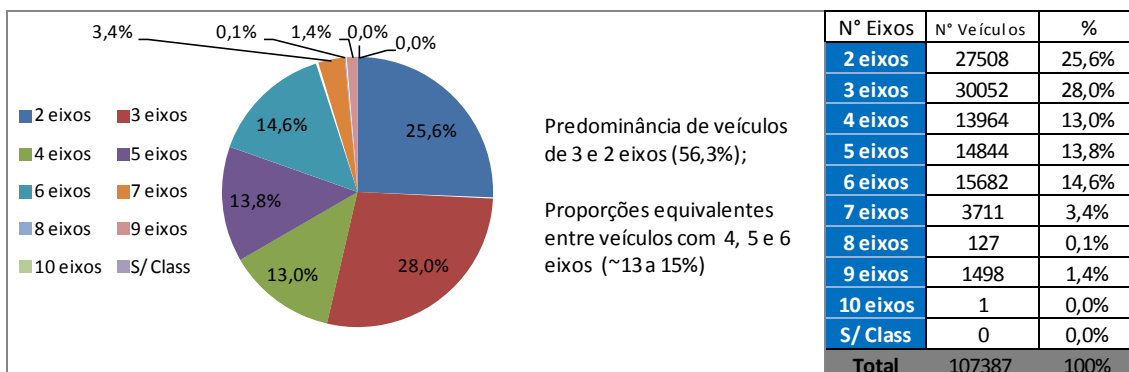
ANEXO 1 – PARECER CONSULTORES

Parecer sobre a análise dos resultados do Estudo do Espectro de Cargas dos Veículos Comerciais rodantes na BR-290/RS, Freeway, através do uso da técnica do Weigh-in-Motion (WIM)

Prof. Jorge A. P. Ceratti & Prof. Washington P. Núñez

Conforme pôde ser visto na análise do banco de dados constituído durante o período de pesquisa para determinação do espectro de cargas atuante na rodovia BR 290/RS através do emprego de um sistema WIM nota-se que esta técnica é inédita no Brasil, não se tem informações sobre pesquisas semelhantes, com o mesmo objetivo desta. De acordo com os dados analisados observa-se que o tráfego é composto, em maior proporção, por veículos com 2 e 3 eixos (classes 2C, 3C e 2S1 com mais de 50% de participação na amostragem coletada) seguido por proporções quase que igualitárias de veículos com 4 eixos, 5 eixos e 6 eixos (cerca de 14%); veículos com mais de 7 eixos representam um pequeno percentual, aproximadamente 5% da amostra analisada.

No gráfico da figura abaixo são apresentados os percentuais encontrados no período de coleta de dados para análise do espectro de cargas da rodovia.



Referente aos métodos de agrupamento de eixos para a composição do espectro de cargas a partir do banco de dados gerado através da pesagem em movimento de praticamente 100% da frota circulante na rodovia (monitoramento contínuo - 24h/dia) no período de 13/03/2013 até 15/04/2013 pode-se notar a importância da metodologia de classificação (diferença entre a classificação *default* do equipamento que apresentou algumas incoerências e a classificação realizada de modo a enquadrar os resultados na classificação nacional realizada em função do espaçamento entre eixos para definição da silhueta do veículo e sua capacidade de carga).

Uma fase importantíssima será, no futuro, trabalhar na adequação ou desenvolvimento, no próprio sistema (o que aparentemente é possível), de uma sistemática de classificação segundo órgão nacional (DNIT) para padronização dos dados já durante a coleta e armazenamento dos dados.

Dessa forma será possível analisar de forma mais ágil os dados de espectro de cargas, sem a necessidade de uma onerosa etapa de “modelagem” dos resultados em planilha eletrônica, conforme foi realizado na presente etapa da pesquisa.

Ao analisarmos os resultados de percentual de sobrecarga encontrados no espectro de cargas gerado na presente pesquisa (9,68 % dos veículos de carga apresentam alguma sobrecarga em um dos eixos), pode-se dizer que o mesmo apresenta coerência (comprovação de valores esperados por alguns pesquisadores envolvidos no projeto). Ao analisar o percentual de sobrecarga médio apresentado – próximo a 10% -, chega-se a conclusão, segundo bibliografias já consolidadas, que o mesmo é capaz de provocar grandes reduções na vida útil do pavimento, sendo este fator de extrema importância no nível de qualidade do serviço oferecido ao usuário da rodovia.

Sabe-se que atualmente estes sistemas ainda estão em fase de homologação, e que haveria a necessidade de sistemas convencionais para conferência final da carga do veículo para autuação dos veículos excedentes na carga transportada, mas a utilização do sistema de pesagem em alta velocidade como o empregado na presente pesquisa será uma importante ferramenta não somente na definição do espectro de cargas mas também na pesagem seletiva, evitando os fatores negativos acima mencionados.

Finalizando, resta comentar que os aspectos mais importantes e inovadores desta pesquisa dizem respeito ao monitoramento contínuo do tráfego (24h/dia) totalizando praticamente 100% da frota de veículos comerciais (em função da instalação de sensores WIM em duas das três faixas da Pista Sul da rodovia). Este é um fator de especial importância, faz-se o monitoramento sem comprometer o uso da rodovia, sem a necessidade de desvio dos veículos de carga para pesagem em balanças fixas ou de baixa velocidade, o que evita a perturbação do fluxo com a formação de filas por exemplo. A tecnologia demonstra-se como potencial eficiente de auxiliar no monitoramento de cargas das vias e auxílios nos sistemas de gerência de pavimentos também.