

Especificação, operação e avaliação de sistemas de pesagem em movimento em velocidade diretriz da via com a utilização de múltiplos sensores (MS-WIM) e análise do comportamento mecânico de pavimentos

Termo de Cooperação Técnica 320/2010 – Destaque Orçamentário nº 26.782.0663.2325.0001

Fase F – Pré-seleção de Pesagem em Movimento com Utilização de MS-WIM

Acompanhamento da Instalação e Calibração dos Sistemas

setembro de 2011



Termo de cooperação técnica 320/2010 , processo 50600.008688/2009-21, destaque orçamentário nº 26.782.0663.2325.0001, publicado no DOU Nº 68, segunda-feira, 12 de abril de 2010, com início em 20 de maio de 2010.

Especificação, operação e avaliação de sistemas de pesagem em movimento em velocidade diretriz da via com a utilização de múltiplos sensores (MS-WIM) e análise do comportamento mecânico de pavimentos

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT

Jorge Ernesto Pinto Fraxe
Diretor Geral DNIT

Roger da Silva Pêgas
Diretor de Infraestrutura Rodoviária

Romeu Sheibe Neto
Coordenador Geral de Operações Rodoviárias

João Batista Berretta Neto
Coordenador de Operações

SUPERINTENDÊNCIA REGIONAL/DNIT/SC

João José dos Santos
Superintendente Regional de Santa Catarina

Edemar Martins
Supervisor de Operações

Fernando Faustino de Souza
Área de Engenharia e Segurança de Trânsito

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

Alvaro Toubes Prata
Reitor

Carlos Alberto Justo da Silva
Vice-Reitor

Edison da Rosa
Diretor do Centro Tecnológico

Antonio Edésio Jungles
Chefe do Departamento de Engenharia Civil

LABORATÓRIO DE TRANSPORTES E LOGÍSTICA - LABTRANS

Amir Mattar Valente, Dr.
Coordenador Geral do LabTrans/UFSC

NÚCLEO DE ESTUDOS DE PESAGEM

Equipe Técnica

Charlene Souza Chiella, Tecnóloga

Flavio De Mori, Dr.

Gustavo Garcia Otto, M. Eng.

Hélio Goltsman, Engº. Eletrônico

Leonardo Soliz, Engº. de Controle e Automação Industrial

Márcio Roberto de Lima Paiva, Dr.

Valter Zanela Tani, Dr.

Apresentação

Trata o presente relatório de um produto do projeto Especificação, operação e avaliação de sistemas de pesagem em movimento em velocidade diretriz da via com a utilização de múltiplos sensores (MS WIM, do inglês *Multiple Sensor WIM*) e análise do comportamento mecânico de pavimentos, objeto de Termo de Cooperação Técnica – Destaque Orçamentário nº 26.782.0663.2325.0001 firmado entre o Departamento Nacional de Infraestrutura – DNIT e a Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC.

Este projeto é a continuação do convênio TT 102-2007 e tem por objetivo geral desenvolver metodologias para especificação e operação de sistemas de pesagem em movimento com múltiplos sensores em velocidade normal de operação da rodovia, bem como avaliar aspectos técnicos, operacionais e econômicos de sua instalação e operação e analisar o comportamento dinâmico do pavimento a partir da identificação, análise e avaliação de sua deterioração, considerando a realidade nacional, no que tange à infraestrutura rodoviária e a legislação vigente, desdobrado nos seguintes resultados esperados:

- ◆ Avaliação operacional e econômica dos sistemas de pesagem instalados durante convênio TT 102-2007;
- ◆ Desenvolvimento de metodologia para especificação de sistemas de pesagem em movimento com a utilização de múltiplos sensores;
- ◆ Desenvolvimento de metodologia para operação de sistema de pesagem em movimento com a utilização de múltiplos sensores;
- ◆ Desenvolvimento de metodologia para identificação e análise da deterioração de pavimentos;
- ◆ Avaliação da deterioração do pavimento;
- ◆ Acompanhamento do planejamento, da operação e avaliação dos sistemas de pré-seleção com a utilização de múltiplos sensores em velocidade diretriz da via de 157 postos de pesagem indicados pelo DNIT.

O presente relatório substitui o relatório que versaria sobre o acompanhamento da instalação e calibração pelo DNIT de sistemas de pré-seleção em velocidade diretriz da

via com a utilização de múltiplos sensores para 161 novos postos de pesagem, no âmbito do Plano Nacional de Pesagem (PNP, 2006), ainda em processo de licitação.

No entanto, dado que a licitação dos novos postos de pesagem do DNIT encontra-se atualmente suspensa, não ocorreu ainda contratação, aquisição, e a consequente instalação e calibração das balanças de pré-seleção destes novos postos de pesagem, o presente relatório, apesar de mantido o título, trata de outras ações e definições de planejamento muito importantes, realizadas pela equipe do projeto, no âmbito do atual Convênio UFSC/DNIT, quais sejam:

- ◆ O modelo de processamento dos dados coletados nas instalações de Araranguá, com pista de testes aberta ao fluxo geral de veículos de carga que demanda ao Posto de Pesagem de Veículos - PPV;
- ◆ O sistema-piloto de PPV com pré-seleção na pista, à velocidade do tráfego, funcionando em conjunto com a balança de fiscalização do PPV de Araranguá.

Inicialmente é apresentado resumidamente o embasamento técnico-científico já desenvolvido no âmbito do presente projeto sobre sistemas de pesagem em movimento.

O modelo de processamento aqui apresentado formaliza a cadeia básica de tratamento e exploração dos sinais, dados e imagens que estão sendo coletados nas instalações da pista de testes do DNIT de Araranguá.

É aqui também definida a especificação básica do sistema-piloto de PPV com pré-seleção na pista, mencionado acima.

Acompanha o relatório impresso, um CD com o relatório em formato digital.

Lista de Abreviaturas e Siglas

| | |
|---------|---|
| ASTM | <i>American Society for Testing and Materials</i> |
| COST | <i>COoperation européenne dans la recherche Scientifique et Technique</i> |
| DNIT | Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes |
| HS-WIM | <i>High Speed WIM</i> - Sistema de pesagem em movimento a alta velocidade |
| INMETRO | Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial |
| LS-WIM | <i>Low Speed WIM</i> - Sistema de pesagem em movimento a baixa velocidade |
| MS-WIM | <i>Multiple Sensor WIM</i> - Sistema de pesagem em movimento com múltiplos sensores |
| NIST | <i>National Institute of Standards and Technology</i> |
| OIML | <i>Organisation Internationale de Métrologie Légale</i> |
| UFSC | Universidade Federal de Santa Catarina |
| WIM | <i>Weigh-in-Motion</i> |

Lista de Figuras

| | | |
|-----------|--|----|
| Figura 1 | Força de impacto medida vs. peso | 12 |
| Figura 2 | Transmissibilidade estrada-carroceria..... | 12 |
| Figura 3 | Filtragem mecânica da irregularidade | 13 |
| Figura 4 | Exemplo de Modelo de dupla onda da Força de impacto..... | 14 |
| Figura 5 | Dinâmica veicular: modelo quarto de carro simplificado..... | 14 |
| Figura 6 | Tipologia dos erros em pesagem WIM | 15 |
| Figura 7 | Quadro de referência para classes de aplicação | 22 |
| Figura 8 | Escopo comparado das especificações OIML e COST323 (Jacob, 2006) ... | 22 |
| Figura 9 | Leiaute dos postos de pesagem..... | 26 |
| Figura 10 | Atual configuração esquemática dos PPVs..... | 29 |
| Figura 11 | Nova configuração esquemática dos PPVs no curto prazo | 29 |
| Figura 12 | Nova configuração esquemática dos PPVs no médio prazo..... | 29 |
| Figura 13 | No longo prazo: taxa de utilização da via | 30 |
| Figura 14 | Fluxo esquemático de dados | 34 |
| Figura 15 | Cadeia “mínima” de processamento de dados | 35 |
| Figura 16 | Leiaute esquemático mostrando o posicionamento do Sistema-Piloto em relação à Pista de Testes do DNIT e ao PPV de Araranguá..... | 38 |
| Figura 17 | Leiaute em perspectiva do sistema-piloto | 39 |
| Figura 18 | Leiaute em planta do sistema-piloto | 40 |
| Figura 19 | Leiaute dos sensores usados na balança MS-WIM e detalhe do pórtico | 40 |

Índice

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | Introdução..... | 9 |
| 2 | Visão Geral dos Sistemas de Pesagem em Movimento..... | 11 |
| 2.1 | Definição de pesagem em movimento (WIM)..... | 11 |
| 2.2 | Força de impacto vs. peso..... | 14 |
| 2.3 | Fontes de erro na pesagem em movimento..... | 15 |
| 2.3.1 | Erro intrínseco da pesagem em movimento..... | 16 |
| 2.3.2 | Erro intrínseco do(s) sensor(es)..... | 16 |
| 2.3.3 | Erro intrínseco do processamento..... | 16 |
| 2.4 | Pesagem em movimento mono sensor..... | 16 |
| 2.5 | Pesagem em movimento multissensor..... | 17 |
| 2.6 | Regulamentação dos meios e métodos da fiscalização do peso..... | 18 |
| 2.7 | Divisor de águas da tecnologia de pesagem..... | 18 |
| 2.8 | Diferença metrológica essencial entre a pesagem estática e a em movimento..... | 19 |
| 2.9 | O projeto europeu - COST323..... | 20 |
| 3 | Estratégia do DNIT de Aperfeiçoamento do Sistema Atual de Controle do Sobrepeso..... | 24 |
| 3.1 | O atual sistema de Controle do Sobrepeso do DNIT..... | 24 |
| 3.2 | Estratégia do DNIT para mudança do paradigma de controle do sobrepeso..... | 26 |
| 3.2.1 | Atuação em prevenção e fiscalização..... | 27 |
| 3.2.2 | Maximizar a eficiência e eficácia da fiscalização, com benefícios para o DNIT e para os usuários..... | 27 |
| 3.2.3 | Estratégia do DNIT de curto, médio e longo prazo..... | 28 |
| 4 | Modelo de processamento dos Dados Coletados em Testes Não Controlados na Pista Experimental de Araranguá..... | 31 |
| 4.1 | Dados primários coletados..... | 32 |
| 4.2 | Dados secundários produzidos..... | 32 |
| 4.3 | Dados terciários produzidos..... | 32 |
| 4.4 | Dados quaternários produzidos..... | 33 |
| 4.5 | Fluxo de dados..... | 33 |

| | | |
|-----|---|----|
| 4.6 | Cadeia mínima de processamento dos dados | 35 |
| 5 | Sistema-piloto de pré-seleção e fiscalização a alta velocidade..... | 37 |
| 5.1 | Especificação do sistema-piloto de pré-seleção e fiscalização a alta velocidade a ser instalado em Araranguá | 38 |
| 5.2 | Operação do sistema-piloto | 41 |
| 6 | Considerações Finais..... | 42 |
| 7 | Referências Bibliográficas | 43 |

1 Introdução

Apesar do fortalecimento pós-privatização dos modais ferroviário e aquaviário, o modal rodoviário continua responsável pela parcela mais significativa do transporte de cargas dentro do Brasil.

As operações rodoviárias de transporte de cargas têm mesmo se intensificado, inclusive com o aumento da carga média transportada por veículo, em função, sobretudo, da integração logística com que têm respondido as empresas às novas condições concorrenciais a que estão submetidas.

A malha rodoviária nacional, composta por rodovias federais, estaduais e municipais, é bastante extensa, e requer ações constantes de manutenção e controle para que sejam garantidas condições mínimas de trafegabilidade.

Sistemas eficientes e eficazes de acompanhamento e controle das operações rodoviárias de transporte de cargas são necessários para garantir a segurança destas operações, a competição econômica saudável entre operadores, e a proteção do patrimônio público representado pela infraestrutura física.

Pesquisas (CEL-COPPEAD, 2006) indicam que aproximadamente 36% dos acidentes em rodovias federais Brasileiras envolvem veículos de carga, o que equivale a um total de cerca de 40 mil acidentes anuais. O tombamento é apontado como a causa de 47% destes acidentes, com fortes impactos sobre as operações.

A probabilidade de ocorrer o tombamento aumenta com a velocidade do veículo, com a severidade das curvas e, em especial, com o peso e arrumação da carga. Daí a recomendação contida no documento citado, sobre a importância, entre outras medidas, do controle do sobrepeso dos veículos de carga.

Se os veículos de carga por si só são mais perigosos, os veículos de carga com sobrepeso:

- ◆ são muito mais difíceis de controlar;
- ◆ precisam de muito mais espaço de frenagem; e
- ◆ operam sobrecarregando ao limite componentes mecânicos críticos para a segurança, sobretudo pneus, freios e suspensões.

Ainda, como nas estradas brasileiras são comuns trechos com alto grau de inclinação vertical e/ou de curvatura horizontal, bem como veículos de carga com baixa relação potência/peso, aos fatores mencionados se soma a perigosa perturbação ao fluxo de tráfego que se observa nestes trechos, pelo desempenho marcadamente inferior dos veículos de carga em relação aos demais.

Do ponto de vista do aperfeiçoamento do ambiente econômico, a prática do sobrepeso compromete seriamente o avanço da produtividade do setor transportes, ao distorcer a competição entre transportadores, com externalização de custos extremamente altos à socioeconômica como um todo.

No entanto, o efeito mais visível do excesso de carga aparece no encurtamento considerável da vida útil dos pavimentos e das obras de arte rodoviárias. Na Alemanha considera-se que, deste ponto de vista, um caminhão equivale a 40.000 veículos de passeio, e que um eixo com 10 toneladas causa 2,44 vezes mais danos ao pavimento do que um eixo com 8 toneladas (F. WEISS, 2007).

Considerando a premissa de que o fluxo de veículos deve ser minimamente perturbado pela fiscalização, o aumento da eficiência e eficácia do controle do excesso de carga vai depender diretamente do grau de automatização e adaptação ao fluxo normal de tráfego dos instrumentos usados neste controle.

Em consequência, observa-se internacionalmente a intensificação do estudo, produção e utilização de sistemas de pesagem em movimento capazes de funcionar a altas velocidades típicas de autoestradas, e com menos participação humana local.

Neste contexto, o DNIT está promovendo a ampliação e modernização da infraestrutura atual de fiscalização do transporte rodoviário de carga, com a contratação de 161 novos Postos de Pesagem de Veículos (PPVs), sendo 94 fixos e 67 móveis. Estes novos postos se somarão a 77 PPVs existentes, reparados ou recuperados no período 2006-2010.

Como previsto no Plano de Trabalho do Termo de Cooperação em vigor entre o DNIT e a Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, está previsto o acompanhamento da instalação e calibração das balanças de pré-seleção para os novos postos em processo de licitação.

No entanto tal acompanhamento ainda não aconteceu, devido à interrupção da Licitação lançada no início de 2011 pelo DNIT para a aquisição dos novos PPVs.

Desta forma são tratados no presente Relatório outros dois temas importantes, quais sejam: a definição do modelo básico de processamento dos dados coletados nos experimentos de Araranguá; e a especificação de um sistema-piloto de PPV com utilizando uma balança MS-WIM para pré-seleção na pista, à velocidade diretriz, funcionando em conjunto com a balança de fiscalização do PPV de Araranguá.

2 Visão Geral dos Sistemas de Pesagem em Movimento

Os sistemas de pesagem em movimento, ou sistemas WIM (Weigh-In-Motion), como são conhecidos internacionalmente, permitem estimar o peso por eixo de veículos rodoviários em movimento, aumentando a eficiência e eficácia do controle do sobrepeso a cargo das autoridades responsáveis pela operação rodoviária.

Conseqüentemente, estes sistemas têm sido objeto de cada vez maior utilização e pesquisa, especialmente na Europa e nos Estados Unidos. A pesquisa relativa aos sistemas WIM nestes países tem tido foco em:

- ◆ melhores métodos de calibração;
- ◆ novos procedimentos para aumento da exatidão a alta velocidade; e
- ◆ novas tecnologias, em especial sensores de peso.

2.1 Definição de pesagem em movimento (WIM)

Um sistema de pesagem em movimento usa sensores montados sobre, dentro ou sob (caso de pontes) o pavimento, para medir a força de impacto aplicada pelo pneu ao pavimento, e, a partir desta medida, estimar a carga suportada pelo pneu.

Como mostra a Figura 1, ao longo da trajetória do veículo, a força de impacto na interface pneu/pavimento oscila em torno do peso, por efeito da dinâmica veicular.

Assim, o desafio é estimar o peso com determinada exatidão e confiabilidade, a partir do comportamento observado da força de impacto no tempo. Este comportamento é essencialmente ditado pela irregularidade do pavimento, que excita a suspensão do veículo, resultando em um padrão específico de dinâmica veicular.

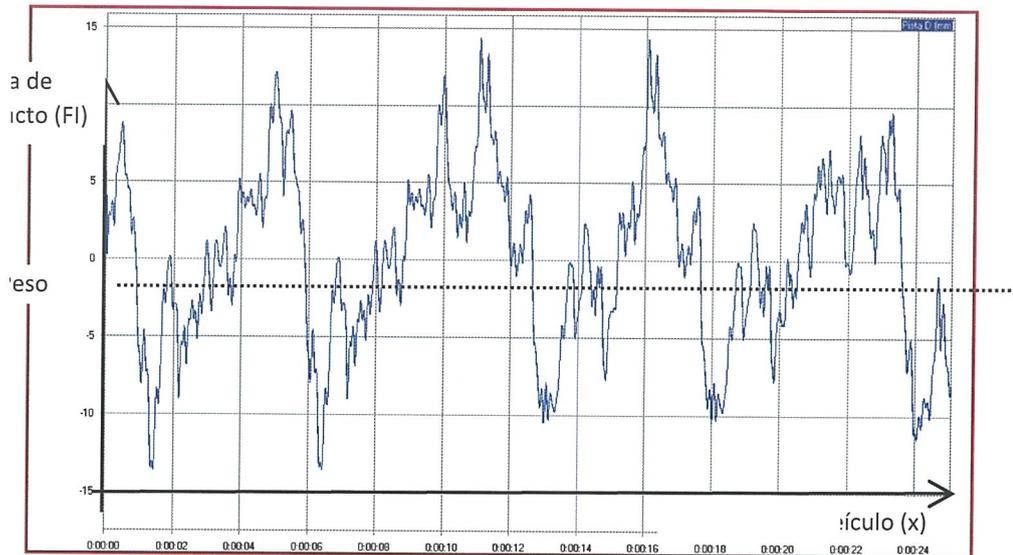


Figura 1 – Força de impacto medida vs. peso

No nível mais básico, a dinâmica dos veículos rodoviários pode ser representada pelo chamado “modelo de quarto de carro”, apresentado na Figura 2 . A suspensão e o pneu procuram isolar a carroceria da irregularidade da estrada, distribuída por uma faixa ampla de frequências.

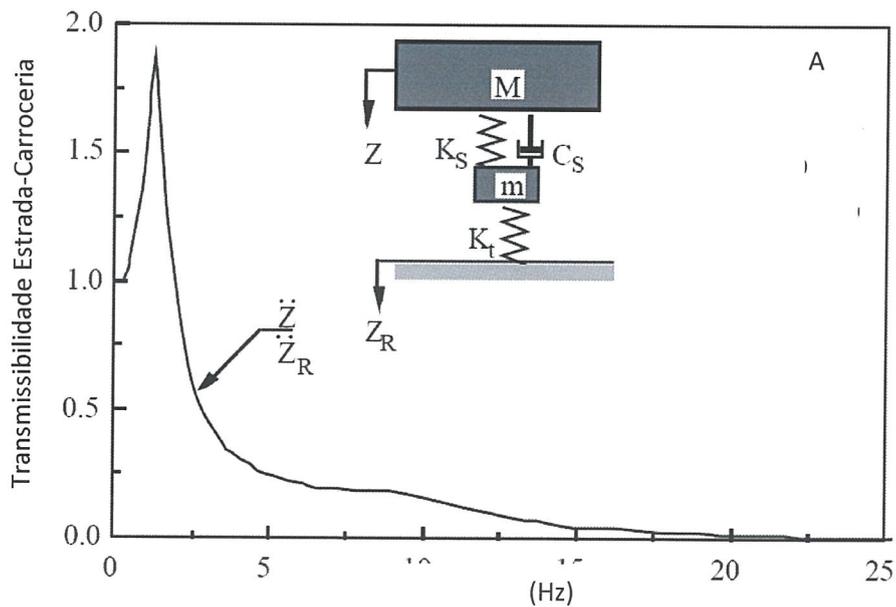


Figura 2 – Transmissibilidade estrada-carroceria

Fonte: Sayers et al, 1998

Como mostra a Figura 2, o grau de isolamento (inverso da transmissibilidade) entre o corpo do veículo (massa suspensa) e o pavimento, provido pelo sistema suspensão-pneu, varia com a frequência da excitação Z_R , recebida do pavimento.

A frequências muito baixas, o corpo do veículo acompanhará exatamente o movimento para cima e para baixo do pavimento. A mais ou menos 1 Hz (para automóveis típicos norte-americanos) ocorre a ressonância da massa suspensa, quando a irregularidade da estrada é amplificada de 1,5 a 3 vezes pela suspensão.

A frequências mais altas, a suspensão absorve a irregularidade recebida pelo pneu, isolando o corpo do veículo da estrada. A mais ou menos 10-15 Hz a massa "m" da roda/eixo entra em ressonância, diminuindo este isolamento.

O desempenho da suspensão como filtro mecânico da irregularidade do pavimento é ilustrado na Figura 3. A irregularidade da estrada (à esquerda) é filtrada pela suspensão (ao centro), resultando na resposta do veículo, à direita (também superposta ao espectro da estrada, à esquerda).

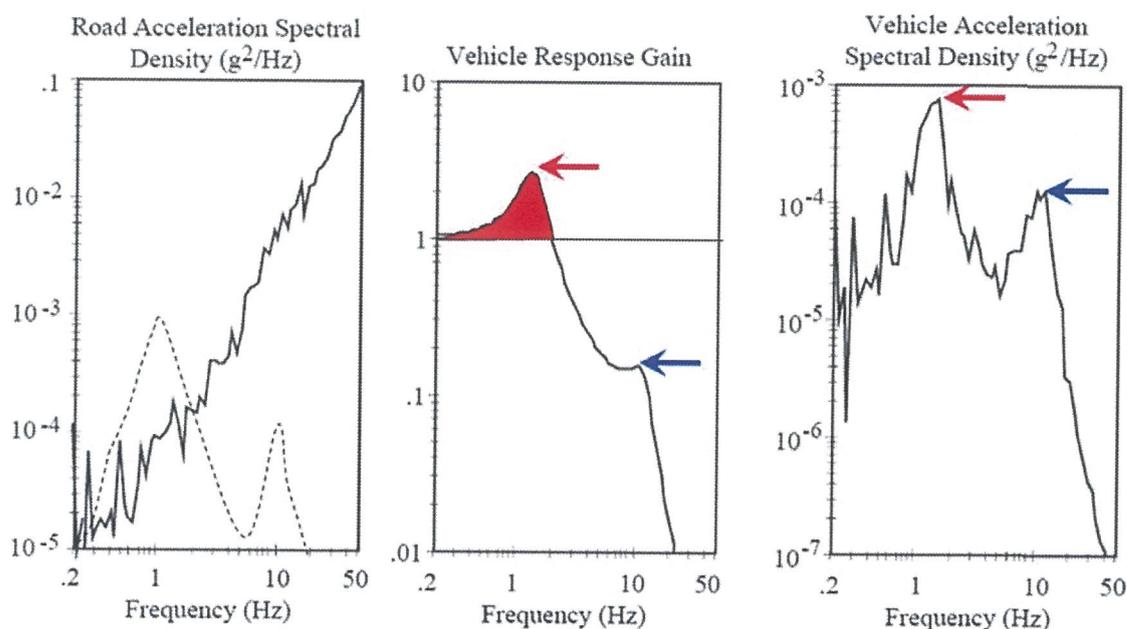


Figura 3 – Filtragem mecânica da irregularidade

Fonte: baseado em Sayers et al, 1998

Na Figura 3, o gráfico à direita mostra que a maioria da energia contida na força de impacto (a resposta do veículo à irregularidade da rodovia) está concentrada em duas frequências principais, correspondendo à ressonância, respectivamente, das massas suspensa e não suspensa (gráfico do meio).

Esta característica geral das suspensões rodoviárias permite que a força de impacto representada na Figura 1 possa ser representada simplificada pelo chamado "modelo de dupla onda", ilustrado na Figura 4.

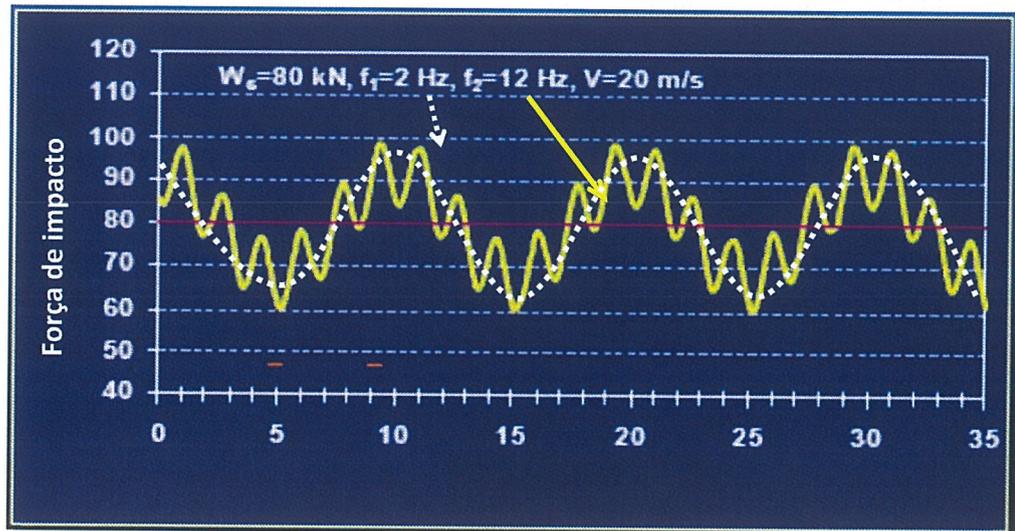


Figura 4 – Exemplo de Modelo de dupla onda da Força de impacto

2.2 Força de impacto vs. peso

Utilizando-se um modelo ainda mais simplificado da interação veículo/pavimento, apresentado na Figura 5, é possível expressar matematicamente a diferença entre a força de impacto que é medida pelos sistemas WIM, e o peso estático que se deseja estimar.

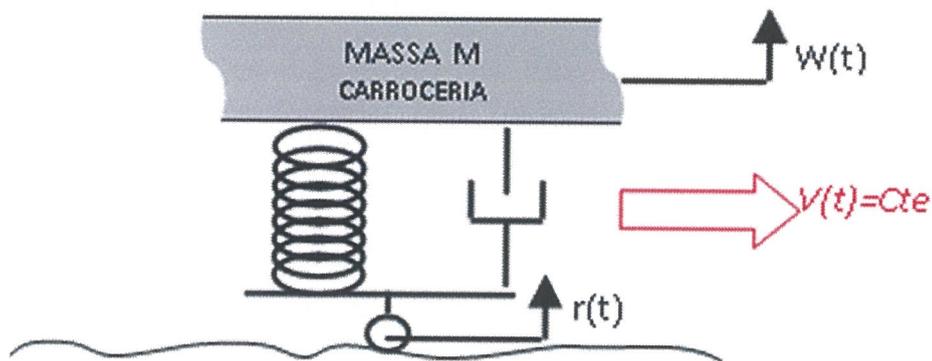


Figura 5 – Dinâmica veicular: modelo quarto de carro simplificado

Sendo:

$$y(t) = W(t) - r(t)$$

WIM = Força de impacto

Peso = $M \cdot g$

Prova-se que:

$$WIM_{x=vt} \approx \text{Peso} - M \left(\frac{d^2 r}{dt^2} + \frac{d^2 y}{dt^2} \right)$$

Como mostra a expressão, o movimento para cima e para baixo do caminhão, causado pela irregularidade do pavimento, aparece como a componente $M(d^2r/dt^2 + d^2y/dt^2)$, a qual é responsável pelas flutuações da força dinâmica de impacto WIM em torno do valor do Peso mostradas na Figura 1 .

Segundo Cebon (1990), para veículos de carga estas flutuações apresentam amplitudes RMS de 10 a 30% do peso estático, e frequências dominantes nas duas faixas:

- ◇ 1,5-4,5 Hz: ressonância da massa suspensa (*bounce e pitch*);
- ◇ 8-15 Hz: ressonância da massa não suspensa (*bounce e roll*).

2.3 Fontes de erro na pesagem em movimento

A Figura 6 ilustra os principais tipos de erro que afetam a exatidão da pesagem em movimento:

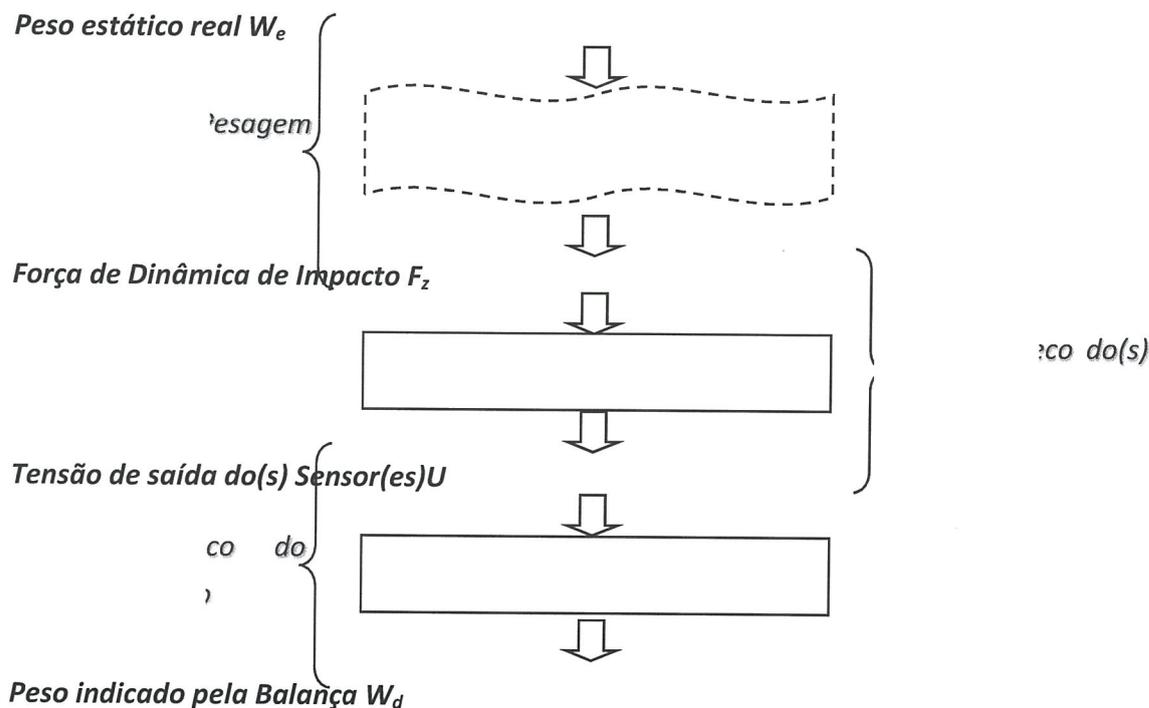


Figura 6 – Tipologia dos erros em pesagem WIM

Fonte: baseado em Scheuter, 2000

O erro total de qualquer balança dinâmica é a diferença entre o peso indicado W_d e o “peso estático real” W_e , definido como o peso sob condições perfeitas, i.e. local de pesagem estática absolutamente nivelado, suspensão do veículo em uma posição neutra, sem fricção, freios não-aplicados.

2.3.1 Erro intrínseco da pesagem em movimento

É o erro causado pela dinâmica veículo/pavimento, intermediada pela suspensão, que cria uma divergência entre a força de impacto dinâmica efetivamente aplicada ao sensor e o peso estático do veículo, eixo ou roda.

Prova-se (p.ex. Cebon, 1990) que este tipo de erro pode ser reduzido com a aquisição e processamento de múltiplas amostras consecutivas da força dinâmica de impacto, ao longo do trajeto do veículo.

2.3.2 Erro intrínseco do(s) sensor(es)

O erro intrínseco do(s) sensor(es) pode ser teoricamente determinado em laboratório, usando uma máquina de teste ou pesos-padrão. Dependendo da tecnologia do sensor, pode-se testar a influência de fatores como: temperatura, posicionamento da carga sobre o sensor, inclinação em relação à carga aplicada, torção, sensibilidade a forças não verticais, repetitividade, deformação, umidade, susceptibilidade eletromagnética, etc., além da máxima frequência de resposta do sensor à aplicação de carga.

Porém, no caso dos sensores embutidos diretamente no pavimento (p.ex. cabos piezelétricos), há ainda que se considerar a influência do módulo do pavimento (Bernard, 2007) sobre as leituras do sensor, constituindo uma parcela do erro intrínseco dos sensores que só pode ser determinada *in situ*.

2.3.3 Erro intrínseco do processamento

Trata-se aqui do erro que pode, em maior ou menor escala, ser introduzido pelas operações de aquisição e tratamento do sinal de saída do sensor (amplificação, filtragem, escalagem, conversão A/D, etc.) e, no caso dos sistemas multissensor, pelo algoritmo interno à balança, que calcula a melhor estimativa do peso estático a partir das amostras da força de impacto produzidas pelos múltiplos sensores.

2.4 Pesagem em movimento mono sensor

Um sistema WIM com um único sensor, conta somente com uma amostra da força de impacto dinâmica para estimar o peso estático.

Para um sistema como este, assumindo sensores de peso ideais (erro intrínseco zero), pode-se mostrar (Cebon, 1990) que o valor esperado do desvio padrão do erro na estimativa do peso estático para determinada roda é igual ao valor RMS da força dinâmica de impacto nesta roda.

Portanto, o grau de exatidão de um sistema WIM mono sensor é limitado fundamentalmente pela dinâmica veicular, determinada pela interação entre as características do veículo e do pavimento.

Uma solução utilizada em pesagem à baixa velocidade é construir um trecho de pista especial, desde antes e até depois do ponto de instalação do sensor de peso (Cebon recomenda um total de 120 m), com baixíssimo grau de irregularidade, para garantir que as cargas dinâmicas sejam baixas o suficiente.

Infelizmente, porém, em condições de alta velocidade (80 a 100 km/h) esta solução se torna tecnicamente desafiadora, e economicamente proibitiva.

2.5 Pesagem em movimento multissensor

Com o advento de sensores de baixo custo no mercado, passou a ser possível usar múltiplos sensores para compensar os efeitos das forças dinâmicas na determinação do peso estático.

Existe uma variedade de métodos de tratamento matemático das saídas de um conjunto de sensores, de modo a obter a melhor estimativa do peso estático. Segundo Cebon (1990), Glover (1988) testou arranjos de até 81 sensores, com espaçamentos de vários tipos: uniforme, linear, geométrico e logarítmico.

Cebon desenvolveu uma teoria geral para o caso de sensores uniformemente espaçados, e adoção da média aritmética das respectivas amostras da força dinâmica como a melhor estimativa do peso estático.

Evidentemente, o método desenvolvido por Cebon exige um bom conhecimento das características mecânicas (frequências de ressonância típicas das suspensões) e operacionais (velocidades) do tráfego de carga a ser pesado.

Dentre as vantagens da utilização de sistemas MS-WIM podem ser ressaltadas a:

- 1) redução da influência das características do pavimento sobre a exatidão da pesagem, reduzindo a necessidade de especificações muito rígidas quanto aos trechos de rodovia elegíveis para instalação do sistema. Obviamente isto pode reduzir consideravelmente os custos associados à implantação da infraestrutura necessária para, por exemplo, a aplicação de multas por excesso de peso;
- 2) redução da influência das características tecnológicas e físicas do sensor WIM sobre a exatidão da pesagem, reduzindo a necessidade de especificações muito rígidas quanto aos tipos de sensor elegíveis para uso no sistema. Novamente, isto tende a reduzir custos, ao ampliar o leque de tecnologias e fornecedores de sensores potenciais;
- 3) ampliação da possibilidade de especificação de um mesmo sistema básico para aplicações que demandam graus de exatidão diferentes (estudos de tráfego, pré-seleção ou fiscalização direta), variando-se apenas o número

e/ou leiaute dos sensores. Isto se traduz em melhoria significativa na relação benefício/custo associada ao investimento nestes sistemas;

- 4) facilitação do processo de calibração da balança WIM, uma vez que este pode ser dividido em duas fases independentes consecutivas: calibração dos sensores (em força de impacto) e calibração da balança (em peso). Esta segunda fase diz respeito ao algoritmo de tratamento das amostras da força de impacto colhidas pelos sensores, podendo fazer uso de técnicas oriundas da pesquisa em inteligência artificial (redes neuronais, lógica *fuzzy*, algoritmos genéticos, sistemas especialistas, etc.). A capacidade adaptativa inerente a estas técnicas permite, em princípio, dotar a balança de certo grau de auto calibração vis-à-vis alterações do pavimento ou do tráfego, garantindo desempenho estável sob uma gama de condições externas, no tocante à acurácia.

Estas vantagens explicam o foco dado aos sistemas MS-WIM no presente projeto, e conseqüentemente no experimento em curso em Araranguá, SC.

2.6 Regulamentação dos meios e métodos da fiscalização do peso

No Brasil, a exemplo do que acontece nos Países desenvolvidos, são regulamentados os meios e métodos legalmente aceitos no exercício da fiscalização, pelos órgãos competentes, do cumprimento das normas de trânsito aplicáveis aos veículos rodoviários de carga.

A autoridade responsável por esta regulamentação é o INMETRO, Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial, uma autarquia federal vinculada ao Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior.

No caso presente, a regulamentação do INMETRO de interesse é a que versa sobre os meios e métodos considerados válidos na pesagem dos veículos rodoviários de carga para efeito de fiscalização pelo DNIT, tendo em vista o que estabelece o Código Nacional de Trânsito quanto aos limites legais do peso aplicado pelos veículos de carga às rodovias.

2.7 Divisor de águas da tecnologia de pesagem

No que tange aos meios e métodos disponíveis para a fiscalização de peso, é necessário distinguir duas modalidades básicas de pesagem de veículos rodoviários: a pesagem estática e a pesagem em movimento.

O caso da pesagem estática se apresenta trivial, já que são aplicáveis meios e métodos genéricos e consagrados de medida de massa, aperfeiçoados pela metrologia ao longo de séculos.

Já a pesagem em movimento, que só passou a ser possível pelo advento de tecnologias que se tornaram realidade de mercado apenas recentemente (duas últimas décadas), apresenta-se como portadora da promessa de ascensão da fiscalização do excesso de peso de veículos de carga rodoviários a um patamar superior de eficácia e eficiência.

Ressalte-se que este aumento na eficácia e eficiência da fiscalização é cada vez mais urgente, dado o aumento generalizado do uso do transporte rodoviário que se observa mundialmente nas economias capitalistas, sejam desenvolvidas ou emergentes.

2.8 Diferença metrológica essencial entre a pesagem estática e a em movimento

Em ambos os casos, cabe à autoridade metrológica definir especificações completas de meios e métodos para a pesagem, cobrindo ambos os aspectos referentes a aprovação de modelo, e aos teste de aceitação e avaliação de acurácia *in situ*.

De uma maneira geral, estas especificações incluem procedimentos padronizados para a seleção do local de instalação, a operação, a calibração e a realização de ensaios de avaliação de instrumentos de pesagem.

No entanto, existe uma diferença metrológica essencial entre a pesagem estática e a dinâmica: na pesagem estática, a variável a ser medida não exhibe variação randômica, já que se trata de uma massa definida, em repouso, sob a ação da gravidade local.

Em oposição, na pesagem em movimento, a variável a ser medida exhibe variação randômica, proveniente da superposição sobre a ação da gravidade de forças dinâmicas provocadas por fatores tais como irregularidades do pavimento, aceleração/desaceleração do veículo, rodas não perfeitamente circulares e/ou não balanceadas, pressão dos pneus, características da suspensão, e até mesmo efeitos aerodinâmicos e ventos.

É importante notar que a variação randômica de uma variável não é o resultado de erros de qualquer espécie, mas sim da própria natureza dos eventos a que esta variável está ligada.

É impossível prever de forma determinística o resultado de qualquer tipo determinado de amostragem de uma variável randômica, que desta forma só pode ser expresso por uma 'distribuição de probabilidades', uma lista de todos os possíveis resultados do tipo considerado de amostragem, e suas probabilidades associadas.

Assim, a força exercida sobre o pavimento por um veículo em movimento representa um processo randômico, que sofre 'n' amostragens quando o veículo passa sobre uma balança MS-WIM com 'n' sensores.

Supondo-se que a média da força exercida pelo veículo sobre o pavimento, ao longo do seu trajeto, seja igual ao peso estático a ser estimado, o máximo que se pode garantir é que a medida feita não diferirá do peso real (a média da população de

medidas) em mais do que um número 'd' de desvios padrão da distribuição de probabilidade da média das amostras, sendo 'd' dependente do 'grau de confiança' assumido.

Em resumo, a acurácia de um instrumento para pesagem em movimento não pode ser estabelecida de forma determinística, metrológica clássica, e sim na forma de um intervalo definido estatisticamente, com determinado grau de confiança.

2.9 O projeto europeu - COST323

O transporte de carga rodoviário cresceu mais de 38% na união europeia num período de 10 anos, de 1995 a 2005, uma tendência que os especialistas afirmam que deve continuar no médio prazo.

Esta situação tem claras implicações para os pavimentos e pontes da Europa, que estarão submetidos a cargas estáticas e dinâmicas crescentes, provocadas por maior número de veículos com a capacidade atual, e novos veículos ainda mais pesados.

Neste contexto, a pesagem em movimento de veículos rodoviários destaca-se como uma ferramenta primordial para dar suporte à fiscalização de peso, além de constituir importante ferramenta para suporte às pesquisas sobre o tráfego, à sua gestão, e à engenharia de pavimentos e pontes.

Foi este imenso potencial incorporado pelos sistemas de pesagem em movimento (*Weigh In Motion – WIM*) que fez com que florescesse nos últimos 20 anos o mercado de sistemas e sensores de pesagem em movimento, e tecnologias associadas, sobretudo na Europa.

Diante destes fatos, a comissão europeia, entendendo que o desenvolvimento da tecnologia incorporada pelos sistemas WIM dependia do estabelecimento de um quadro de referência comum, acolheu em 1992, no âmbito do programa de cooperação COST (*Coperation européenne dans le domaine de la recherche Scientifique et Technique*), o Projeto COST 323 – *Weigh-In-Motion of Road Vehicles* (1993-98).

O objetivo geral do projeto COST 323 foi o de promover o desenvolvimento e a adoção das tecnologias WIM e suas aplicações, e facilitar a troca de experiências sobre o assunto entre diferentes países Europeus.

Os principais objetivos específicos do projeto COST 323 foram:

- 1) fazer um inventário dos requisitos da demanda europeia por sistemas WIM;
- 2) levantar e avaliar as informações existentes sobre o assunto;
- 3) realizar um trabalho preliminar sobre o desenvolvimento de especificações técnicas europeia para sistemas WIM;
- 4) acordar mecanismos e protocolos para uma base de dados pan-europeia de instalações e dados WIM;

- 5) coletar e disseminar informações técnicas e científicas;
- 6) trocar experiências e conclusões com outros projetos internacionais.

O COST 323 foi um dos mais produtivos projetos do programa *COST Transport*, tendo alcançado inúmeros resultados importantes, dentre os quais se destaca, no presente contexto, uma primeira versão de uma proposta de especificação europeia de sistemas WIM, publicada como Apêndice 1 do relatório final do projeto COST 323 (*European WIM Specification, Version 3.0, August 1999*).

A especificação COST 323 aborda em profundidade os assuntos mais importantes relacionados aos sistemas WIM, como:

- ◇ terminologia;
- ◇ requisitos de usuário e de performance;
- ◇ critérios para escolha de locais para instalação (sítios WIM);
- ◇ requisitos ambientais;
- ◇ verificação e calibração *in loco*;
- ◇ classes de acurácia e tolerâncias, em relação a peso;
- ◇ aprovação de tipo (modelos novos ao mercado);
- ◇ verificações iniciais e 'em serviço';
- ◇ procedimentos para verificar a acurácia;
- ◇ armazenamento, processamento e transmissão de dados;
- ◇ requisitos simplificados;
- ◇ aceitação e instalação de sensores;
- ◇ métodos de calibração;
- ◇ formatação de resultados e ferramentas computacionais.

Os expressivos resultados deste projeto da comunidade europeia têm feito dele uma referência constante, mundialmente. Com relevância para o tema do presente texto, a diferença metrológica essencial entre a pesagem estática e a pesagem em movimento é o foco conceitual principal das especificações COST323.

Assim, o relatório final do projeto COST323, na página 11 do seu Apêndice 1 (*European WIM Specification, Version 3.0, August 1999*), afirma:

A exatidão de um sistema WIM em condições de uso, isto é, sob a carga dos pneus do tráfego passante, só pode ser definida de um modo estatístico (B. Jacob, 1997), por um intervalo de confiança do erro relativo de uma unidade (eixo, grupo de eixos ou veículo), definido como: $(Wd - Ws)/Ws$, onde Wd é a força de impacto ou carga dinâmica medida pelo sistema WIM, e Ws a carga/peso estático correspondente (ou qualquer outro valor de referência especificado), da mesma unidade. Tal intervalo de confiança, centrado no peso/carga estático, é notado: $[-\delta; +\delta]$, onde δ é a tolerância para um nível de confiança π (por exemplo 90 ou 95%).

Desta forma, pelo COST323, a acurácia de um sistema WIM é expressa por dois parâmetros: uma tolerância máxima δ (%), e um nível de confiança mínimo π_0 (%). O valor de δ varia com os requisitos de precisão da classe de aplicação considerada, como pode ser visto no exemplo apresentado na Figura 7

| Classe de Aplicação | Descrição | Tolerância |
|------------------------------|---|------------------------|
| Estatísticas | Estudos técnicos e econômicos do transporte de carga, avaliação geral do tráfego em estradas e pontes, coleta de dados estatísticos, etc. | $\delta \leq 20$ a 30% |
| Infraestrutura e Pré-seleção | Análise detalhada do tráfego, projeto e manutenção de estradas e pontes, classificação acurada de veículos, pré-seleção para fiscalização, etc. | $\delta \leq 10$ a 20% |
| Fins Legais | Aplicações comerciais e em fiscalização, desde que autorizado pela legislação vigente. Na Europa, atualmente só a pesagem dinâmica em baixa velocidade (LS-WIM) ou a estática têm respaldo legal para estas aplicações. | $\delta \leq 5$ a 10% |

Figura 7 – Quadro de referência para classes de aplicação

Fonte: COST323

Já o valor de π_0 depende grandemente das condições de medida, principalmente as de repetitividade ou reprodutividade do ambiente e da amostra colhida, e do tamanho da amostra e conteúdo (tipos de veículo).

Estas condições de repetitividade e reprodutividade são classificadas no COST 323 em: r1-repetibilidade plena; r2-repetibilidade estendida; R1-reprodutibilidade limitada; R2-reprodutibilidade plena.

O quadro apresentado na Figura 8, de autoria de Bernard Jacob, do LCPC da França, chefe do Comitê de Administração do Projeto COST323 (Jacob, 2006), resume as diferenças principais entre as especificações de cunho metrológico da OIML e as de cunho estatístico do COST323:

| | OIML | COST323 |
|----------------------------|---|--|
| Estágio de desenvolvimento | 2ª minuta de Recomendação Internacional (11/96 – 99) | Versão 3 (8/99) aprovada e amplamente distribuída no mundo |
| Origem | WIM para trens . | Necessidades dos usuários requisitos de acurácia |
| Objeto | Medida de massas (veículos de carga, eixos?) | Estimativa de pesos e cargas (veículos de carga, eixos) |
| Objetivos | Propósitos legais: comércio, fiscalização? | Todos (exceto comércio) dependendo da legislação |
| Condições | Baixa velocidade, localização específica | Alta ou baixa velocidade |
| Requisitos | Metrológicos (100% das medidas dentro do erro máximo permitido - emp) | Estatísticos (tolerâncias+níveis de confiança) |

Figura 8 – Escopo comparado das especificações OIML e COST323 (Jacob, 2006)

A questão das diferenças entre requisitos metrológicos e estatísticos é uma discussão atual, relevante e extremamente técnica na área de metrologia, tendo por raiz o conceito de consistência, em múltiplas avaliações de um mesmo mensurando.

Em artigo recente sobre esta questão, Kacker descreve as diferenças essenciais entre os conceitos de 'consistência estatística' e 'consistência metrológica' (Kacker et alii, 2009):

As principais diferenças entre a consistência estatística e a consistência metrológica são as seguintes: (i) Conceito de consistência estatística está de acordo com o conceito GUM de incerteza. (ii) A consistência estatística não se aplica aos resultados de medida expressos como valores medidos com incertezas padrão associadas. (iii) A consistência estatística não requer que os valores medidos sejam avaliações para o mesmo mensurando. A consistência metrológica se aplica somente a avaliações para o mesmo mensurando que sejam rastreáveis à mesma referência. (iv) a suposição a priori na consistência estatística é que os valores medidos são inconsistentes. Resultados credíveis para o mesmo mensurando devem ser metrologicamente consistentes, a menos que algo esteja errado. (v) A consistência metrológica é um conceito que diz respeito a pares, enquanto a consistência estatística se aplica a qualquer número de resultados. (vi) A teoria da consistência estatística admite que alguns valores medidos sejam discrepantes. Na consistência metrológica, valores discrepantes indicam problemas com o procedimento de medida ou incertezas declaradas. Com interesse para o presente texto, destaca-se aqui o item (vi) da citação acima: "A teoria da consistência estatística permite que alguns dos valores medidos sejam considerados outliers [pontos fora da curva]. Na consistência metrológica, outliers indicam problemas com os procedimentos de medida ou incertezas declaradas."

3 Estratégia do DNIT de Aperfeiçoamento do Sistema Atual de Controle do Sobrepeso

A atual configuração do sistema de controle do sobrepeso em estradas federais, de responsabilidade do DNIT, foi projetada há 36 anos, no âmbito do Plano Diretor de Pesagem anunciado em 1975, pelo então Departamento Nacional de Estradas de Rodagem - DNER.

O encolhimento das verbas antes à disposição exclusiva do Ministério dos Transportes, e, sobretudo, o tremendo crescimento do transporte rodoviário de cargas observado desde 1975, tornou a parte do sistema original remanescente altamente ineficaz e ineficiente.

A ineficácia do sistema está essencialmente ligada à baixa capacidade dos PPVs, que resulta em baixo nível de fiscalização, em função de constantes fechamentos dos postos, provocados por excesso de tráfego. O emprego de postos fixos, inspirados no modelo americano de fiscalização, mas em estradas abertas, ao contrário do que acontece nos EUA, significa também grande facilidade de evasão do tráfego infrator.

O sistema atual é também ineficiente, no sentido de que a fiscalização impõe altos custos tanto aos usuários quanto ao DNIT. Aos usuários, porque são obrigados a diminuir a velocidade e sair da estrada para serem fiscalizados, além de frequentemente enfrentarem filas. Ao DNIT, pelo alto custo de construção e manutenção da grande estrutura física do posto e igualmente alto gasto com pessoal.

A realidade acima levou o DNIT a repensar nos últimos anos o atual sistema de controle, e a traçar uma estratégia de modernização gradual deste sistema, uma mudança de paradigma, essencialmente pela incorporação ao atual projeto e operação do significativo progresso apresentado pelas chamadas tecnologias de informação e comunicação (TICs) desde 1975.

3.1 O atual sistema de Controle do Sobrepeso do DNIT

Em 1975 ocorreu um grande aumento do tráfego rodoviário de cargas no Brasil, como consequência de meia década de crescimento econômico contínuo a níveis sem

precedentes, um período que ficou conhecido internacionalmente com o do “milagre brasileiro”.

Em resposta a esta ameaça à infraestrutura, o então Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, DNER, tomou a decisão de desenvolver um Plano Diretor de Pesagem (PDP), como parte de planos governamentais estratégicos visando assegurar o contínuo crescimento econômico e industrial.

O espírito que norteou tal iniciativa foi a necessidade de atender aos dois aspectos principais da administração de qualquer sistema de transporte:

- ◊ Operação: preservação dos pavimentos e da estrutura das obras de arte das estradas, aumento da segurança das operações, conservação da energia usada em transportes, redução da poluição ambiental, e promoção de um ambiente concorrencial sadio entre transportadores;
- ◊ Planejamento: estabelecimento de uma base de dados nacional sobre o transporte rodoviário, para ser usada no planejamento socioeconômico nacional e regional, e no seu reatamento sobre o sistema de transporte rodoviário, como base do desenvolvimento econômico sustentado.

Desde o início do desenvolvimento do Plano Diretor de Pesagem, foi tomada a decisão de que o objetivo de controle do sobrepeso deveria ser alcançado com mínima perturbação do fluxo de tráfego não-infrator. As soluções adotadas não deveriam aumentar significativamente os tempos de viagem médios, dados seus reflexos sobre os custos operacionais.

O PDP foi desenvolvido em três fases consecutivas:

Fase I – Avaliação tecnológica dos principais sistemas de pesagem disponíveis internacionalmente, desde aspectos operacionais, exatidão, capacidade e atrasos de viagem, até aspectos legais ligados à autuação e aplicação de multas. Durante esta fase ficou claro que a pesagem em movimento teria que ser a espinha dorsal de qualquer solução a ser adotada, a despeito do fato de que tais sistemas ainda estavam em estágio inicial de produção e adoção no mundo;

Fase II – Com a pesagem em movimento em mente, estudos especiais foram realizados, de forma a obter o máximo possível de dados sobre:

- 1) limites de carga por eixo aplicados na Europa e nos EEUU;
- 2) efeitos do excesso de carga sobre a vida útil dos pavimentos; e
- 3) inventário de dados operacionais sobre os sistemas de pesagem usados na Europa e nos EEUU, incluindo capacidades dos postos fixos de pesagem, necessidade de pessoal, custos fixos, etc.

Paralelamente, um estudo de tráfego completo (volume e O/D) foi realizado, cobrindo todo o Brasil, com vistas à localização dos postos fixos a serem construídos. As

conclusões destes estudos recomendaram a instalação de 132 estações fixas de pesagem em movimento, bem como o uso de 100 balanças móveis, destinadas a desencorajar as tentativas de fuga que fatalmente ocorreriam. Posteriormente, devido a restrições orçamentárias, o número de estações fixas de pesagem planejadas foi reduzido para 73. Os projetos operacionais e de engenharia (geometria, drenagem, pavimento, rede elétrica, sinalização vertical e horizontal, etc.) foram então produzidos, sempre levando em conta que o tráfego de veículos não-infratores deveria ser minimamente perturbado.

Fase III – Licitações internacionais foram realizadas em 1977, para a construção dos postos de pesagem e para a aquisição das balanças de pré-seleção (60 km/h) e de fiscalização (10 km/h). A empresa Siemens A.G., da Alemanha, foi escolhida para fornecer as balanças de pré-seleção (tipo *bending plate*, fabricadas pela subcontratada PAT GmbH, com exatidão nominal de 20%, e a empresa Smith Industries, do Reino Unido, as de fiscalização (tipo *load cell*), com exatidão nominal de 1% para peso bruto. Para fins de aceite, estas últimas balanças foram testadas e certificadas pelo organismo brasileiro responsável pela certificação metrológica de equipamentos de medida à época. A operação dos postos (24 horas, 7 dias por semana) foi terceirizada pelo DNER.

O leiaute adotado para os postos de pesagem do DNER em 1977, e que sobrevive até hoje nos postos do DNIT, é apresentado na Figura 9.

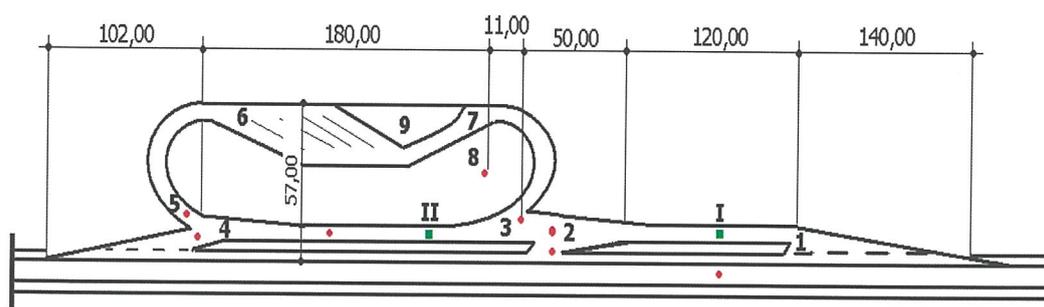


Figura 9 – Leiaute dos postos de pesagem

Legenda: 1- pista de desaceleração de 80 a 60 km/h; 2- pista de aceleração de volta à estrada; 3- pista de desaceleração de 60 a 10 km/h; 4- pista de aceleração de volta à estrada; 5- via de acesso ao estacionamento; 6- estacionamento para veículos infratores; 7- pista de saída do estacionamento; 8- centro de controle; 9- abrigo do gerador e garagem do veículo para reboque; I – balança de pré-seleção (*bending plate*@60 km/h); e II – balança de fiscalização (*load cell*@10 km/h). Pavimentos em concreto Portland. Medidas em metros.

3.2 Estratégia do DNIT para mudança do paradigma de controle do sobrepeso

Ao longo das discussões que tem acompanhado o presente projeto, dois requisitos do DNIT se consolidaram, quanto a uma estratégia de curto, médio e longo prazo visando

o incremento progressivo e paulatino da eficiência e eficácia dos instrumentos e métodos atualmente usados no controle do sobrepeso:

- ◇ atuar em prevenção, além de fiscalização: significa explorar eventuais padrões revelados pelos dados da fiscalização, possibilitando agir preventivamente sobre as causas de infrações sistemáticas, em suas origens;
- ◇ maximizar a eficiência e eficácia da fiscalização, com benefícios para o DNIT e para os usuários: no limite, exige fiscalizar diretamente no fluxo de tráfego, à velocidade diretriz, com balanças dinâmicas cada vez mais exatas. Ou seja, implica maximizar o investimento em tecnologia, com minimização do investimento em construção civil e em mão-de-obra local. Menor uso de mão-de-obra significa também menor risco de erros e de manipulação fraudulenta.

Como meta de mais longo prazo, o DNIT considera ainda a possibilidade, fortemente dependente de tecnologia, de, em vez de aplicar Multa, cobrar dos flagrados com excesso de carga uma Taxa de Utilização da Via progressiva, em função da magnitude do excesso e da distancia percorrida, um conceito que tem afinidade com o conceito de *road pricing*, já empregado internacionalmente em centros urbanos.

3.2.1 Atuação em prevenção e fiscalização

Como já dito, trata-se aqui de explorar ao máximo a base de dados propiciada pelo sistema de controle do sobrepeso do transporte rodoviário de cargas, de modo a trazer à tona eventuais problemas específicos associados a determinadas rodovias (ou trechos destas), rotas, indústrias, cargas, configurações de veículos, ou mesmo a embarcadores ou transportadores específicos (ver p.ex. Van Loo, 2007).

Identificado determinado aspecto sistemático da prática do sobrepeso, os principais fatores envolvidos podem ser isolados e estudados, para dar origem a ações focadas do poder público sobre os agentes dos setores econômicos envolvidos e/ou sobre a legislação que regula estes setores.

A oferta do transporte rodoviário de carga inclui aqui os subsetores que produzem os meios de que este transporte lança mão: fabricantes de caminhões e implementos/acessórios, e fabricantes de balanças para verificação da carga por embarcadores e motoristas, além dos subsetores formadores de mão-de-obra para o transporte.

3.2.2 Maximizar a eficiência e eficácia da fiscalização, com benefícios para o DNIT e para os usuários

Do ponto de vista do DNIT, 100% dos infratores deveriam ser submetidos à pesagem fiscalizatória. Por outro lado, do ponto de vista dos usuários, 100% dos não-infratores deveriam ser liberados desta pesagem, sem sair do fluxo ou diminuir a velocidade.

Infelizmente, a menos que a balança de pré-seleção seja 100% exata, e esteja perfeitamente calibrada, os dois objetivos acima não podem ser atingidos simultaneamente. Portanto, o melhor compromisso possível entre ambos deve ser buscado.

Um exemplo de quadro de referência interessante para uma abordagem racional a esta busca pelo melhor compromisso foi desenvolvido por Katz et alii (2003), para a avaliação da operação de estações de pesagem típicas norte-americanas, em cujo projeto se baseiam fortemente os Postos de Pesagem de Veículos (PPVs) em uso no Brasil.

Dentro deste quadro de referência, o atraso médio (*delay*) imposto ao tráfego pela operação de fiscalização foi modelado, como função das características:

- 1) do posto de pesagem: parâmetros de tráfego das vias internas, pré-seleção interna ou externa ao posto, bem como velocidade de operação, exatidão e intervalo de confiança das balanças usadas, e
- 2) do tráfego: taxa e distribuição, no tempo e em peso, das chegadas.

3.2.3 Estratégia do DNIT de curto, médio e longo prazo

Como mostrado no item anterior, o projeto dos PPVs atualmente em uso exige que o tráfego saia da estrada, canalizando-o num sistema de vias internas, para total controle, representando investimentos em obras civis, que só se justificava à época do projeto (1975), quando tanto os equipamentos de pesagem quanto os de controle do fluxo eram muito mais caros e menos confiáveis do que os atuais.

O modelo dos postos em uso exige também muito pessoal, inclusive diretamente envolvido na operação, aumentando a chance de erros e, ficando susceptível a manipulação fraudulenta da fiscalização.

Com a emergência na última década de equipamentos de pesagem e de identificação automática de veículos cada vez mais baratos e eficazes, diminuiu a necessidade de controlar fisicamente, por meio de vias dedicadas em concreto, o fluxo dos veículos, o que permite diminuir paulatinamente a estrutura física do posto de pesagem, e também a participação humana direta na fiscalização.

A seguir são representadas esquematicamente a configuração atual dos PPVs (Figura 10), e a estratégia de curto, médio e longo prazo do DNIT, visando a mudança paulatina do paradigma de controle do sobrepeso.

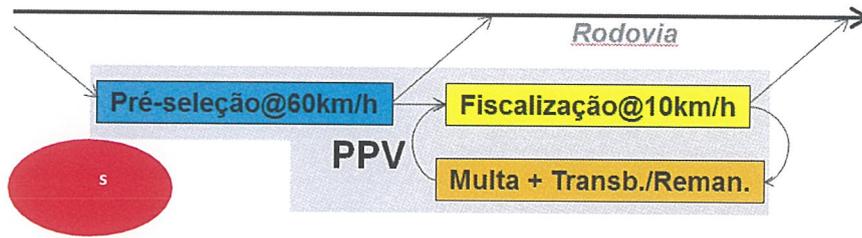


Figura 10 – Atual configuração esquemática dos PPVs

No curto prazo (licitação em curso), a pré-seleção dos veículos para fiscalização sai do PPV, e passa a ser feita na própria estrada, à velocidade diretriz (Figura 11).

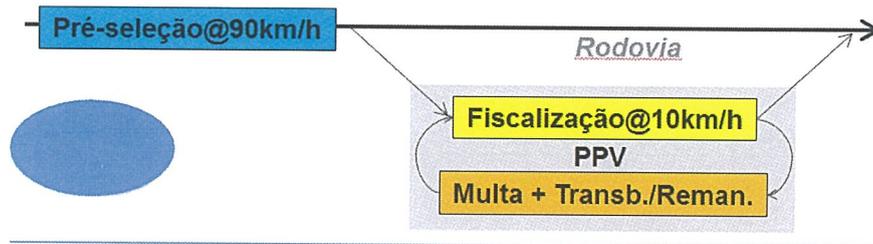


Figura 11 – Nova configuração esquemática dos PPVs no curto prazo

No médio prazo, a tecnologia e a legislação permitindo, a fiscalização direta no fluxo de tráfego se tornará realidade, embora permaneça ainda a necessidade de manter uma espécie de PPV mínimo, com as instalações necessárias para a citação dos infratores e a realização do transbordo do excesso de carga acima de determinado percentual (Figura 12).

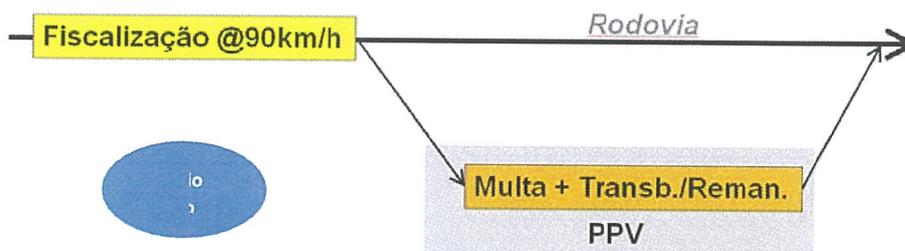


Figura 12 – Nova configuração esquemática dos PPVs no médio prazo

A longo prazo, uma opção passível de ser implementada é substituir a Multa por Excesso de Carga por uma Taxa de Utilização da Via - TUV, a ser cobrada dos infratores em domicílio, uma ideia que tem afinidades com o conceito de *road pricing*. O valor da

TUV seria fixado em função do excesso de carga praticado e da distância percorrida, porém com progressividade (Figura 13).

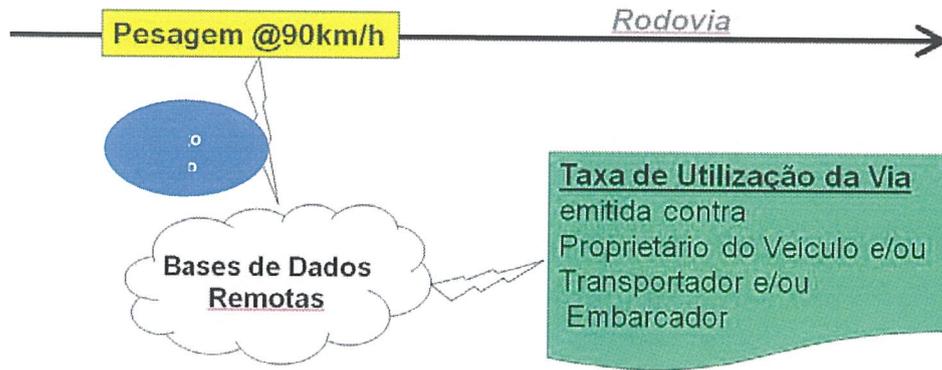


Figura 13 – No longo prazo: taxa de utilização da via

4 Modelo de processamento dos Dados Coletados em Testes Não Controlados na Pista Experimental de Araranguá

A metodologia para especificação de sistemas MS-WIM desenvolvida no presente projeto representa a formalização e consolidação da experiência acumulada em um experimento de longo prazo ora em curso, em uma pista de testes especialmente construída pelo DNIT em Araranguá, SC, o qual segue o planejamento apresentado no documento *TT-102-2007-produto-complementar-8.pdf*, disponível na internet em <http://www.dnit.gov.br/rodovias/operacoes-rodoviaras/convenios-com-a-ufsc>.

O foco deste experimento é a utilização de arranjos de múltiplos sensores de peso, como forma de tornar mais previsível o grau de exatidão da pesagem realizada a alta velocidade, em função do tipo, tecnologia, número, e leiaute dos sensores utilizados, em linha com as pesquisas que ora se realizam na Comunidade Europeia e nos EUA.

Os sensores/sistemas em teste foram instalados em uma pista em concreto asfáltico originalmente com 600 m, e recentemente acrescida de mais 150 m, construída como uma extensão da pista de acesso ao Posto de Pesagem de Veículos do DNIT em Araranguá, situado no km 418 da rodovia BR-101 Sul, em Santa Catarina.

No presente contexto, um sistema de pesagem em movimento é considerado como sendo composto de quatro subsistemas:

- 1) captura de dados (sensores de pesagem e outros, inclusive de imagem);
- 2) tratamento de sinais e processamento de dados;
- 3) tele transmissão de dados; e
- 4) sinalização (painéis de mensagem variável, indicadores de velocidade, etc.).

Neste Capítulo será tratado do segundo subsistema apresentado – tratamento de sinais e processamento de dados em testes não controlados.

Por testes não controlados, entende-se aqui aqueles realizados com a pista de testes de aberta ao fluxo integral de tráfego de carga fiscalizado pelo PPV de Araranguá, SC.

O modelo adotado para a aquisição, armazenamento e análise de dados, isola o processamento de sinais (local, em Araranguá) do processamento de dados (remoto, em Florianópolis), até o armazenamento no SGV-Sistema de Gerenciamento Viário do LabTrans, cujas funcionalidades facilitam diferentes tipos de *queries* e análises.

4.1 Dados primários coletados

A cada passagem de um veículo de carga pelo trecho instrumentado da pista de testes, a ocorrência no tempo de cada um dos seguintes eventos será registrada:

- ◇ início da detecção da presença de um veículo por cada laço indutivo (<código do evento + tag data-hora>);
- ◇ final da detecção da presença de um veículo por cada laço indutivo (<código do evento + tag data-hora>);
- ◇ início da detecção da presença de um eixo por cada linha de sensores de peso (<código do evento + tag data-hora>);
- ◇ final da detecção da presença de um eixo por cada linha de sensores de peso (<código do evento + tag data-hora>);
- ◇ amostras consecutivas do sinal analógico (Volts) produzido pela presença de um eixo sobre cada linha de sensores (<código do evento + tag data-hora>, de cada amostra).

4.2 Dados secundários produzidos

A partir dos dados primários acima apresentados, é possível produzir os seguintes dados secundários sobre cada veículo:

- ◇ imagem frontal/lateral, coletada por videocâmara acionada pelo início ou final da detecção da presença de um veículo por um laço indutivo;
- ◇ velocidade, calculada a partir do lapso de tempo entre a detecção do primeiro eixo do veículo por linhas de sensores de peso consecutivas, com espaçamento conhecido;
- ◇ valor de pico do sinal analógico produzido pela presença de um eixo sobre cada linha de sensores de peso amplificada (valor máximo das amostras deste sinal);
- ◇ área sob o sinal (A) produzido pela presença de um eixo sobre cada linha de sensores de peso amplificada (somatório das amostras deste sinal).

4.3 Dados terciários produzidos

A partir dos dados primários e secundários acima elencados, é possível produzir os seguintes dados terciários sobre cada veículo:

- ◇ placa de licenciamento, a partir do processamento por OCR da imagem frontal colhida;

- ◇ comprimento aproximado, a partir da velocidade e do intervalo de tempo entre o início e o final da detecção do veículo por um laço indutivo;
- ◇ no. total de eixos, a partir da contagem do número de eixos detectados pela primeira linha de sensores, entre o início e o final da detecção da presença de um veículo pelo primeiro laço indutivo;
- ◇ no. de ordem de cada eixo, a partir do mesmo procedimento acima, associando um número de ordem a cada eixo detectado pela primeira linha de sensores, entre o início e o final da detecção da presença de um veículo pelo primeiro laço indutivo;
- ◇ espaçamento entre eixos consecutivos, pela multiplicação do intervalo de tempo entre eixos consecutivos (acima) pela velocidade;
- ◇ detecção de eixos duplos, pela comparação do valor de pico do sinal produzido pelo primeiro eixo (que é sempre simples) com o dos eixos seguintes;
- ◇ peso W por eixo, $[W \approx (V * A) * C]$, onde $[V = \text{velocidade}]$, $[A = \text{área sob o sinal}]$, e $[C = \text{constante de calibração}]$.

4.4 Dados quaternários produzidos

A partir dos dados primários, secundários e terciários acima detalhados, é possível produzir os seguintes dados quaternários sobre cada veículo:

- ◇ classe, a partir de: comprimento aproximado, no. de eixos, espaçamentos entre eixos e número de ordem de eixos duplos;
- ◇ PBT, pela soma dos pesos por eixo de todos os eixos.

4.5 Fluxo de dados

A Figura 14 ilustra o fluxo de dados, desde a aquisição e processamento inicial, em Araranguá, até o processamento e armazenamento final, em Florianópolis.

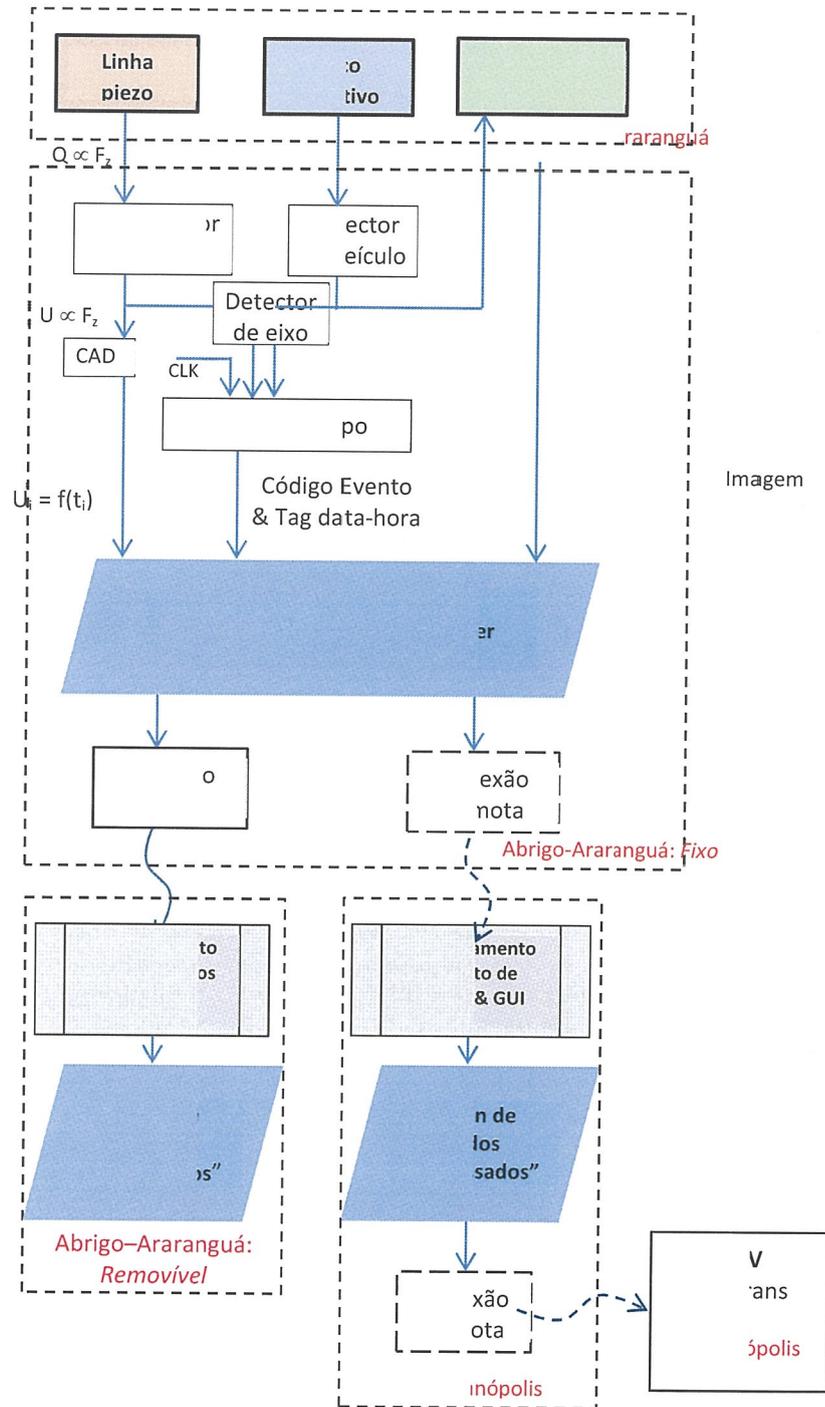


Figura 14 - Fluxo esquemático de dados

4.6 Cadeia mínima de processamento dos dados

Como mostra a figura acima, a partir da Base de Dados Primários, diversas versões diferentes de processamento subsequente destes dados podem e devem coexistir, de modo a aproveitar o ambiente de pesquisa e desenvolvimento oferecido pela UFSC.

Porém, define-se uma cadeia de processamento “mínima”, a partir dos Dados Primários coletados e armazenados na pista de testes de Araranguá, para atendimento aos objetivos formais do projeto. Os elos seguintes desta cadeia são ilustrados na Figura 15 .

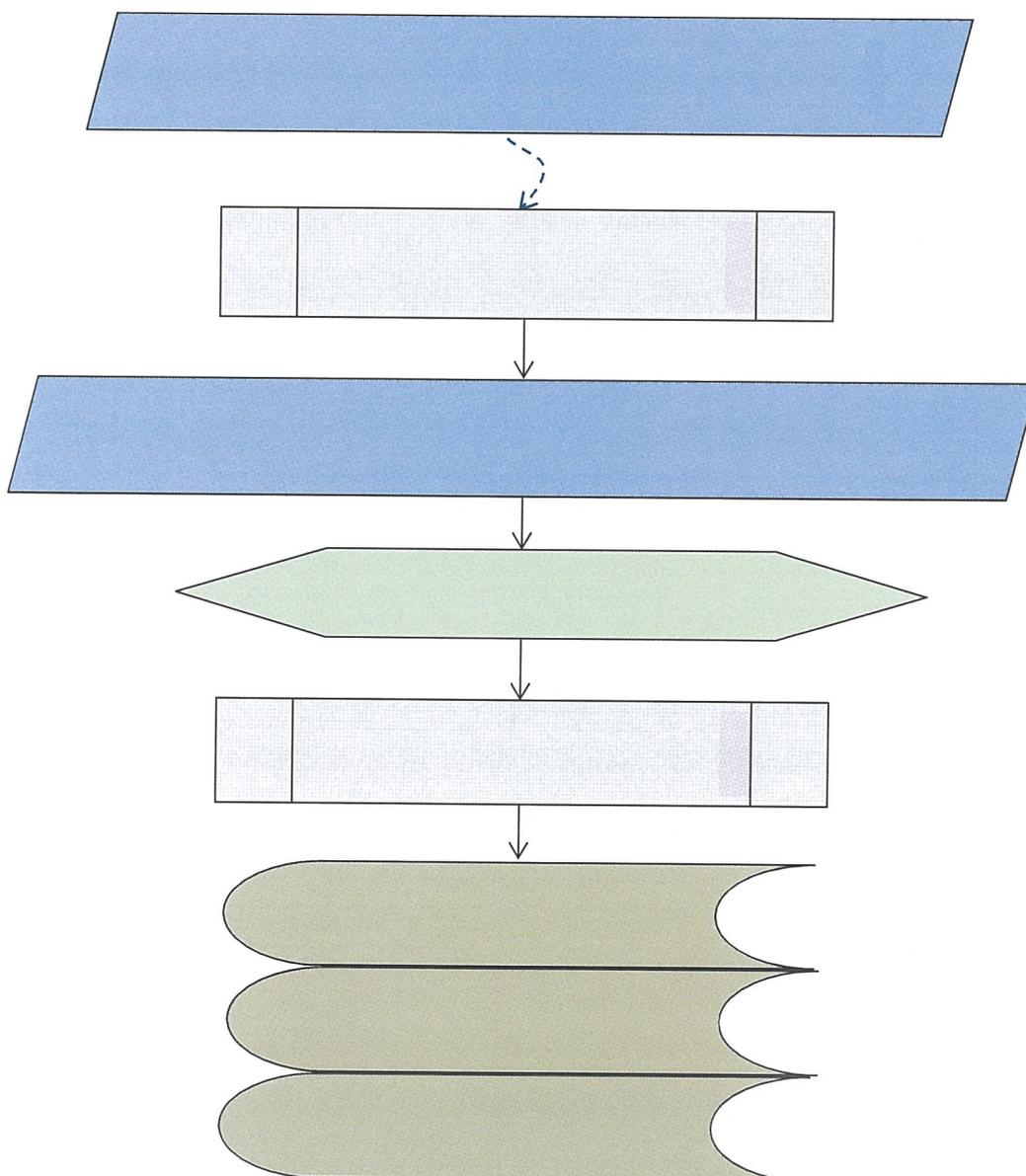


Figura 15 - Cadeia “mínima” de processamento de dados

A Figura 15 mostra que a base de dados primários (tal como definida no item 4.1), transmitida do campo (Araranguá), é processada no escritório, em Florianópolis, dando origem à base de dados secundários a quaternários (tal como definido nos itens 4.2 a 4.4).

A “definição da balança” diz respeito ao conjunto específico de sensores de peso individuais, dentre todos os disponíveis, que constitui a balança MS-WIM cuja classe de exatidão (Tabela “ACCURACY” das Especificações COST323) será avaliada, a partir dos dados coletados e das referências consideradas.

5 Sistema-piloto de pré-seleção e fiscalização a alta velocidade

No âmbito do Convênio em vigor entre o DNIT e a Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, o Núcleo de Estudos em Pesagem (NEP), do Laboratório de Transportes (LabTrans), vem desenvolvendo também parcerias e eventos internacionais, visando manter atualizada a base de conhecimento necessária para dar suporte ao contínuo aperfeiçoamento pelo DNIT do seu sistema de fiscalização da operação rodoviária, em especial quanto aos limites da carga transportada.

Neste contexto, destaca-se em 2011 a organização pela Universidade Federal de Santa Catarina, a Associação Internacional de Pesagem em Movimento e a Associação Catarinense de Engenheiros do 1º Seminário Internacional de Pesagem em Movimento realizado em Florianópolis entre 3 e 7 de abril, com a participação de especialistas de 13 países, sendo que a íntegra dos trabalhos, painéis de discussões e palestras podem ser acessadas pelo sitio www.wimbrasil.com.br.

Dentre os inúmeros trabalhos interessantes apresentados neste Seminário, destacou-se a apresentação por pesquisadores da República Checa de um inovador sistema de pesagem em movimento com múltiplos sensores (MS-WIM), que obteve a aprovação pelas autoridades metrológicas daquele País para a fiscalização direta de peso, a velocidades de autoestrada (até 110 km/h).

Considerando a importância para o DNIT do feito técnico representado pelo sistema checo, foram imediatamente iniciadas conversações com os pesquisadores daquele País, visando uma parceria com o presente projeto, no âmbito do Convênio DNIT/UFSC.

Como resultado, estabeleceu-se uma parceria do Projeto com parceiros europeus envolvidos no desenvolvimento da balança MS-WIM checa, visando a instalação de um sistema piloto de pré-seleção e fiscalização a alta velocidade em Araranguá, cujas especificações técnicas são apresentadas a seguir.

5.1 Especificação do sistema-piloto de pré-seleção e fiscalização a alta velocidade a ser instalado em Araranguá

O sistema-piloto consiste basicamente de uma balança MS-WIM de alta velocidade acoplada a uma videocâmara com leitor de placas (OCR), que identifica um veículo com suspeita de sobrepeso e transmite esta informação a um Painel de Mensagens Variáveis mais à frente, por meio do qual o veículo suspeito é informado de que precisa entrar em seguida na pista de teste do DNIT, que também serve de novo acesso ao PPV, para ser fiscalizado. A Figura 16 ilustra o leiaute das instalações.

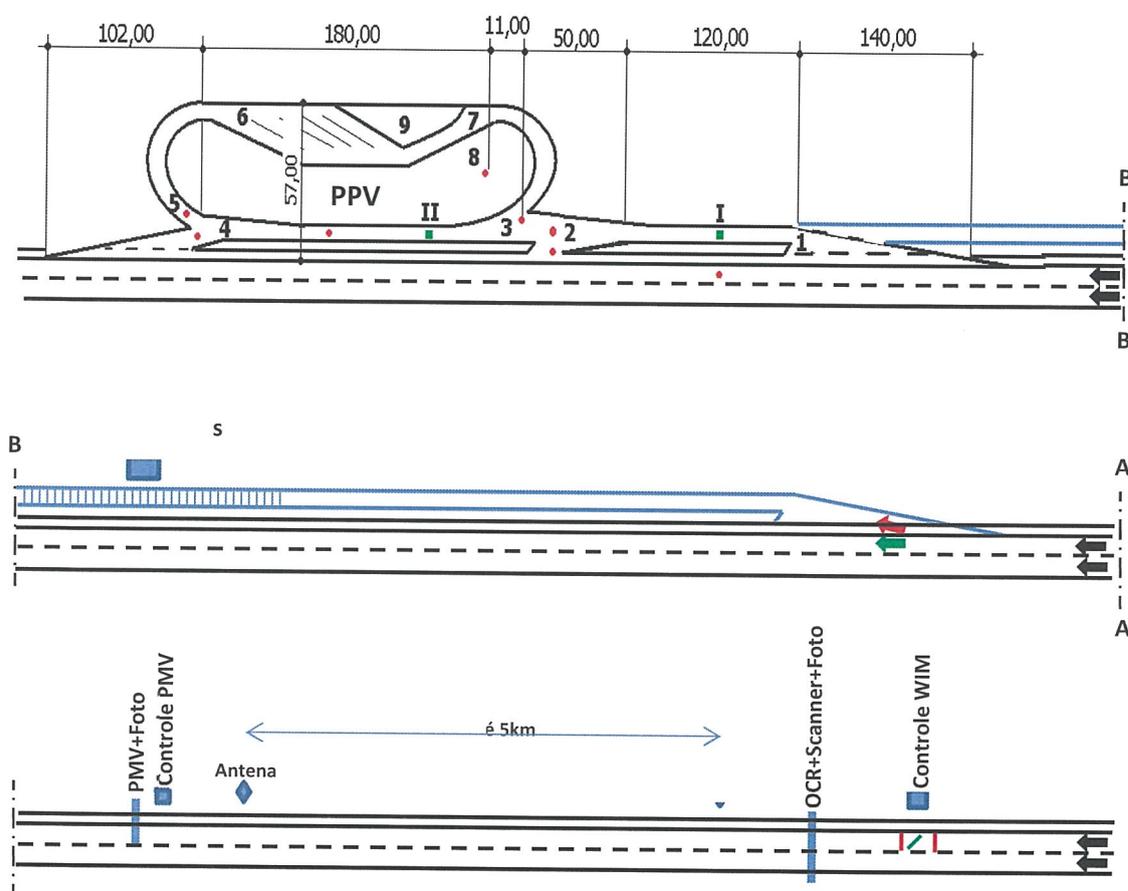


Figura 16 - Leiaute esquemático mostrando o posicionamento do Sistema-Piloto em relação à Pista de Testes do DNIT e ao PPV de Araranguá

A parte da instrumentação é mostrada em maior detalhe nas três figuras que se seguem. Nestas figuras podem-se notar também as câmeras de segurança para identificação de veículos em fuga, e o sistema de varredura a laser (*scanner*), para

levantamento da silhueta dos veículos pesados, e, em consequência de suas dimensões máximas.

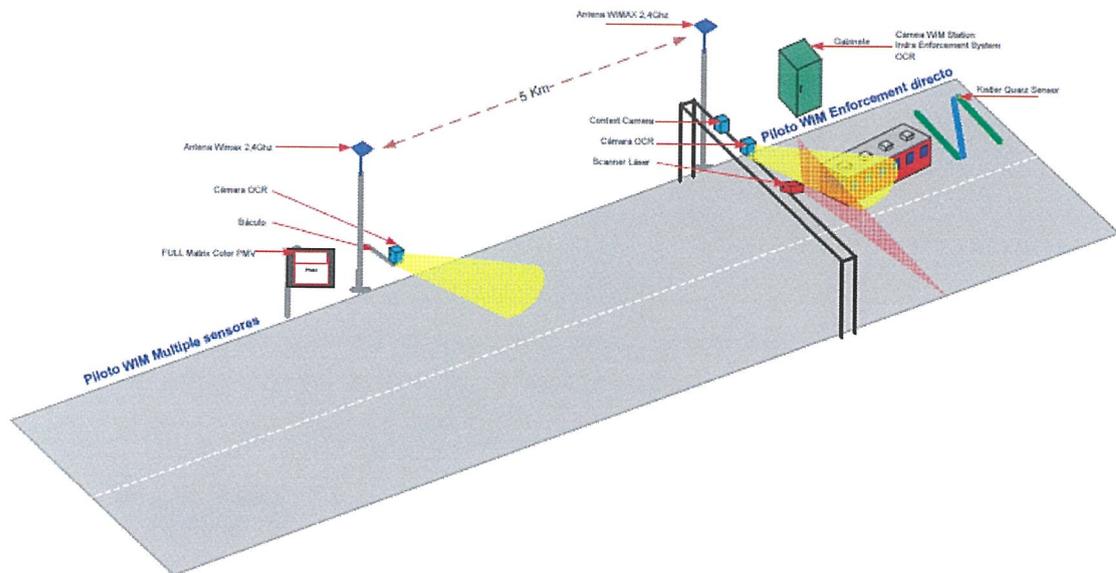


Figura 17 - Leiaute em perspectiva do sistema-piloto

Da esquerda para a direita, na Figura 17 , são ilustrados:

- 1) Painel de Mensagens Variáveis (PMV) matricial, a cores, montado em um pórtico tipo bandeira;
- 2) antena de radiocomunicação (WIMAX 2,4 GHz) e uma videocâmara com OCR, montados em um poste;
- 3) videocâmara para controle de evasão, uma videocâmara com OCR e um scanner a laser (levantamento da silhueta dos veículos), montados em um pórtico;
- 4) antena de radiocomunicação (WIMAX 2,4 GHz), montada em um poste;
- 5) gabinete à prova de vandalismo, contendo o controle do sistema MS-WIM e do sistema de fiscalização baseado em OCR;
- 6) sensores de peso e de detecção do posicionamento lateral dos veículos (e de rodas duplas), instalados no pavimento.

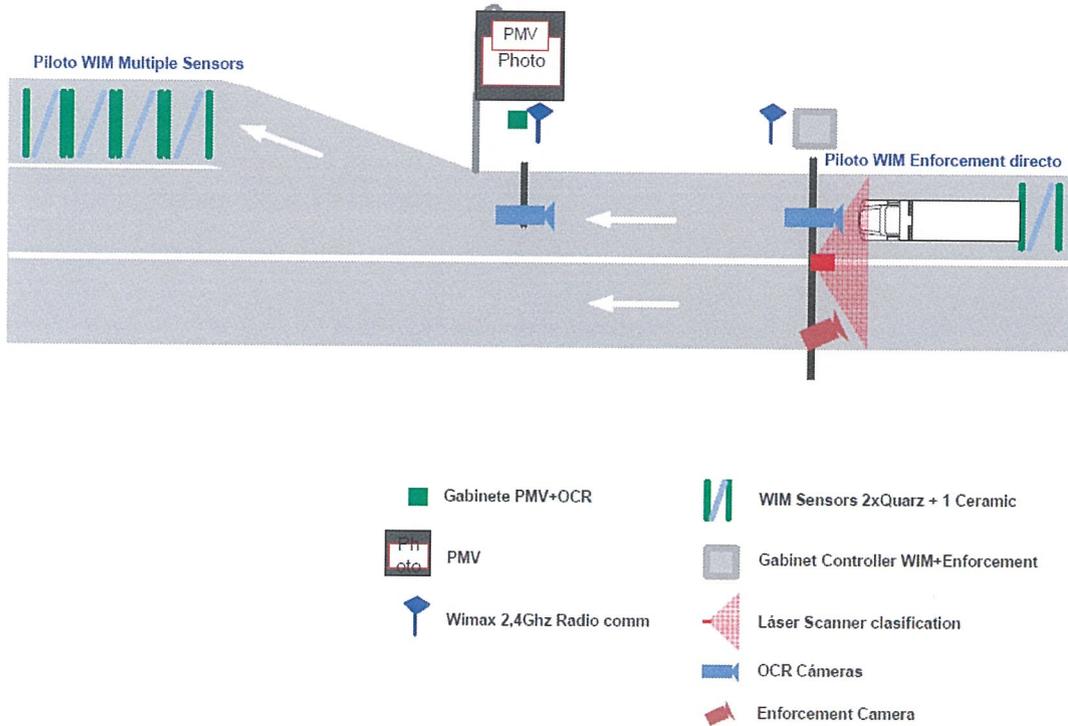


Figura 18 - Leiaute em planta do sistema-piloto

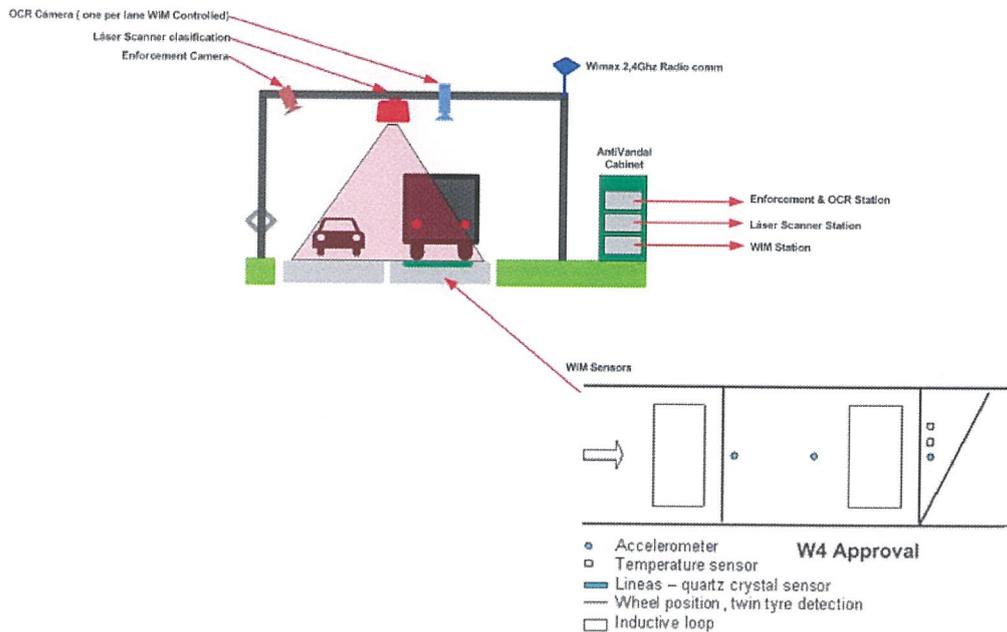
Preselection & Enforcement Pilot in Santa Catarina, Brazil


Figura 19 - Leiaute dos sensores usados na balança MS-WIM e detalhe do pórtico

Na Figura 19 aparece em detalhe o leiaute dos sensores usados no sistema WIM de pesagem a alta velocidade:

- 1) dois laços indutivos;
- 2) duas linhas de sensores de peso de quartzo;
- 3) uma linha de sensor piezo cerâmico em ângulo (detecção da posição lateral da roda, e do uso de roda dupla);
- 4) dois sensores de temperatura do pavimento, a duas profundidades;
- 5) três acelerômetros.

5.2 Operação do sistema-piloto

Como visto anteriormente, no sistema-piloto a pré-seleção dos veículos suspeitos de infração a serem submetidos à fiscalização no PPV de Araranguá passará a ser feita por uma balança WIM de alta velocidade instalada na estrada, a montante do PPV.

Neste caso, para os testes bastará impor (p.ex. via software) ao sistema de pré-seleção original do PPV que direcione todos os veículos à balança lenta, de fiscalização.

Considerando que tanto os veículos pré-selecionados na estrada quanto os fiscalizados no PPV serão identificados por câmeras com OCR, uma comparação das respectivas bases de dados será suficiente para análise de desempenho.

Neste caso, um indicador central de desempenho é o percentual de veículos pré-selecionados confirmados como infratores na balança de fiscalização.

Alternativamente, será também possível comparar o desempenho da nova balança MS-WIM de alta velocidade, das balanças MS-WIM possíveis de serem formadas a partir do conjunto de sensores instalados na pista de testes do DNIT, e das balanças WIM usadas no PPV.

Neste caso, o PMV do sistema-piloto direcionará todos os veículos para a pista de testes, independentemente de terem apresentado sobrepeso na pesagem WIM a alta velocidade ou não.

Estando os três sistemas referenciados a uma mesma base de tempo, e os respectivos sistemas de identificação de veículos funcionando perfeitamente, será possível montar *off-line*, em escritório, uma base de dados unificada, contendo dados coletados sobre os mesmos veículos, consecutivamente nos três sistemas, o que permitirá comparar o desempenho dos mesmos.

6 Considerações Finais

Dado que a licitação dos novos postos de pesagem do DNIT encontra-se atualmente suspensa, não ocorreu ainda a aquisição, e a conseqüente instalação e calibração das balanças de pré-seleção destes novos postos de pesagem.

Desta forma, o presente relatório trata de outras ações e definições de planejamento muito importantes, realizadas pela equipe do projeto, no âmbito do atual Convênio UFSC/DNIT, quais sejam:

- ◊ O modelo de processamento dos dados coletados nas instalações de Araranguá, com pista de testes aberta ao fluxo geral de veículos de carga que demanda ao Posto de Pesagem de Veículos - PPV;
- ◊ O sistema-piloto de pré-seleção na pista, à velocidade do tráfego, funcionando em conjunto com a balança de fiscalização do PPV.

O modelo de processamento aqui apresentado formaliza a cadeia básica de tratamento e exploração dos sinais, dados e imagens que estão sendo coletados nas instalações da pista de testes do DNIT de Araranguá.

Foram aqui também apresentadas as especificações de um sistema-piloto de PPV com pré-seleção na pista, à velocidade diretriz da via, que está sendo projetado, e será construído, com a participação de parcerias internacionais desenvolvidas pelo NEP/LabTrans da UFSC.

7 Referências Bibliográficas

- BRIAN, T. e Bergan, A. (1993) The Use of Dual Weighing Elements (Double Threshold) To Improve the Accuracy of Weigh In Motion Systems, and the Effect of Accuracy on Weigh Station Sorting. International Road Dynamics Inc. USA
- CEBON, D. et alii (1990) Design of multiple-sensor weigh-in-motion systems. Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers. Vol. 204
- CENTRO DE ESTUDOS EM LOGÍSTICA (2006) Acidentes no Transporte Rodoviário de Cargas no Brasil, CEL-COPPEAD - UFRJ, Rio de Janeiro, RJ
- COST Project (1999) European WIM Specification. COST 323 “Weigh-in-Motion of Road Vehicles”, Final Report, Appendix 1
- GLOVER, M.H. (1988) Weighing axles in motion with a multiple sensor system. TRRL working paper WP VED/88/50, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne, UK
- JACOB, B. (2006) COST323 - European Specification on WIM of Road Vehicles. Apresentação em arquivo pdf [Specif_fin.pdf]
- JACOB, B. (2007) Overview of WIM Technologies and sensors. Apresentação em slides para a equipe DNIT/UFSC. LCPC, França
- KACKER, R.N., Kessel, R., Sommer, K-D, Bian, X (2009) Comparison of Statistical Consistency and Metrological Consistency. XIX IMEKO World Congress. Fundamental and Applied Metrology. September 6–11, 2009, Lisbon, Portugal
- KATZ, B., Rakha, H., Al-Kaisy, A. () A Modeling Framework and Case Study Evaluation of Weigh Station Operations. Science Applications International Corporation. Virginia Tech Transportation Institute. Bradley University. USA
- SAYERS, M.W. et al (1998) The Little Book of Profiling. University of Michigan. USA
- SCHEUTER, F. (1998) Evaluation of Factors Affecting WIM System Accuracy. 2nd COST 323 Conference. Lisbon, Portugal

THIONN, C. (2007) Pesage en France, Ministere de l'ecologie, du developpement et de l'amenagement durables, DGMT/DTMRF/TR. Apresentação em slides para a equipe DNIT/UFSC. LCPC, França

WEISS, F. (2007) TDS WIM Presentation. Traffic Data Systems GmbH. Apresentação em slides para a equipe DNIT/UFSC. ROBOT Visual Systems, Alemanha