Campus de São Carlos

**DESEMPENHO DE PAVIMENTO EM FAIXAS DE TRÁFEGO
DISTINTAS DE RODOVIAS**

MARONY COSTA MARTINS

ORIENTADOR: PROF. DR. JOSÉ BERNARDES FELEX

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**ESCOLA DE ENGENHARIA
DE SÃO CARLOS**

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

Departamento de Transportes

**DESEMPENHO DE PAVIMENTO EM FAIXAS
DE TRÁFEGO DISTINTAS DE RODOVIAS**

Marony Costa Martins

DEDALUS - Acervo - EESC

31100035776

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Transportes

Orientador: Professor Doutor José Bernardes Felex

São Carlos
1996

Class.	<u>Terc-EESE</u>
Curr.	<u>3406</u>
Tombo	<u>067/96</u>

Transportes

st 744711

Martins, Marony Costa
M135p Desempenho de pavimento em faixas de tráfego distintas de
rodovias / Marony Costa Martins.-
São Carlos, 1996
1v.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de São
Carlos- Universidade de São Paulo, 1996
Orientador: Professor Doutor José Bernardes Felex

1. Engenharia de Transportes - Infra-estrutura. I. Título

Agradecimentos

Aos meus Pais, Antonio Caetano Martins e Maria Enir Costa Martins;

Ao Professor Doutor José Bernardes Felex, pela orientação;

Ao Professor Segundo Carlos Lopes, pela sugestões e incentivo;

Aos Professores Miranda, Litelton e Manoel, da Universidade Federal do Ceará, pela orientação e aconselhamento;

Aos Professores e Funcionários do Departamento de Transportes da Escola de Engenharia de São Carlos;

Aos amigos Suelly, Thomaz, Kennedy, Jairo, Plínio, Paulinho, Gigante, Morasco e Oliveira pela contribuição aos trabalhos em campo, amizade e solidariedade;

A Valéria Maria Sestini, pela colaboração e amizade;

Aos Funcionários do Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo, Residência de São Carlos pela colaboração e amizade;

A Polícia Militar do Estado de São Paulo, Posto de Polícia Rodoviária de São Carlos, pela colaboração;

Aos amigos e colegas do Departamento de Transportes da Escola de Engenharia de São Carlos;

Aos que direta e indiretamente contribuíram com esse trabalho.

Sumário

I. INTRODUÇÃO	1
I.1 CONCEITOS SOBRE ESTUDOS DE COMPORTAMENTO DE PAVIMENTOS	3
I.2 A FORMULAÇÃO TEÓRICA ADOTADA	6
II. CONCEITOS DE ESTATÍSTICA APLICADOS NESSE TRABALHO	13
II.1 DISTRIBUIÇÕES DE PROBABILIDADES	15
II.2 INFERÊNCIA ESTATÍSTICA	17
II.2.1 ESTIMATIVA DE MÉDIAS	17
II.2.2 O TESTE DE HIPÓTESES	19
II.2.3 O TESTE z , PARA A MÉDIA DE UMA POPULAÇÃO, A PARTIR DE GRANDES AMOSTRAS	20
II.2.4 ESTIMATIVA DE INTERVALOS DE CONFIANÇA DE MÉDIAS A PARTIR DE GRANDES AMOSTRAS	22
II.2.5 O TESTE t PARA ESTIMATIVAS DA MÉDIA DE POPULAÇÃO	22
II.2.6 INFERÊNCIAS SOBRE DUAS VARIÂNCIAS EM POPULAÇÕES - O TESTE F	24
II.2.7 INFERÊNCIAS SOBRE DUAS MÉDIAS DE POPULAÇÕES. GRANDES AMOSTRAS INDEPENDENTES	27
II.2.8 INFERÊNCIAS SOBRE DIFERENÇAS ENTRE MÉDIAS DE POPULAÇÕES. PEQUENAS AMOSTRAS	28
III. COLETA E ANÁLISE PRELIMINAR DE DADOS	30
III.1 RESUMO DE HISTÓRIA DE PAVIMENTO DA VIA WASHINGTON LUIZ	31
III.2 CLASSIFICAÇÃO E CONTAGEM DE TRÁFEGO NA WASHINGTON LUIZ	31
III.3 AS COTAS DA SUPERFÍCIE DE PAVIMENTO	37

IV. ESTUDOS SOBRE A ACELERAÇÃO VERTICAL	40
IV.1 ESTIMATIVAS DA ACELERAÇÃO VERTICAL MÉDIA QUADRÁTICA	40
IV.2 VISUALIZAÇÃO DE RELAÇÕES ENTRE ACELERAÇÕES E DESEMPENHO DE FAIXAS DE TRÁFEGO	44
IV.3 TESTES DE HIPÓTESES SOBRE ACELERAÇÃO VERTICAL	48
IV.4 O QUOCIENTE DE IRREGULARIDADE	53
V. CONCLUSÕES E SUGESTÕES	55
V.1 GENERALIDADES	55
V.2 O USO DA ESTATÍSTICA	58
V.3 SUGESTÕES	59
VI. BIBLIOGRAFIA	60

Lista de figuras

FIGURA 1 - ESCALA PARA ESTIMATIVA DE CAPACIDADE INDIVIDUAL DE SERVIÇO DE RODOVIAS.....	3
FIGURA 2 - MEDIDOR DE RUGOSIDADE BPR.....	6
FIGURA 3 - O MAYSMETER.....	7
FIGURA 4 - O MODELO QUARTER-CAR	7
FIGURA 5 - PERFIL LONGITUDINAL DE PAVIMENTO PARA ANÁLISE DA ACELERAÇÃO VERTICAL	9
FIGURA 6 - $P(A < X < B) =$ A ÁREA SOMBREADA.....	16
FIGURA 7 - INTERVALO DE CONFIANÇA DAS MÉDIAS	18
FIGURA 8 - TESTE z , PARA A MÉDIA DE UMA POPULAÇÃO, QUANDO A HIPÓTESE ALTERNATIVA CONTÉM O SÍMBOLO $>$. (TESTE PARA CAUDA À DIREITA).....	21
FIGURA 9 - TESTE z PARA A MÉDIA DE UMA POPULAÇÃO, QUANDO A HIPÓTESE ALTERNATIVA CONTÉM O SÍMBOLO $<$ (TESTE PARA CAUDA À ESQUERDA)	21
FIGURA 10 - TESTE z PARA A MÉDIA DE UMA POPULAÇÃO, QUANDO A HIPÓTESE ALTERNATIVA CONTÉM O SÍMBOLO $\neq$ (TESTE COM DUAS CAUDAS)	21
FIGURA 11 - REGIÃO CRÍTICA DO TESTE t , PARA A MÉDIA DE UMA POPULAÇÃO, QUANDO A HIPÓTESE ALTERNATIVA CONTÉM O SÍMBOLO $>$ (TESTE PARA CAUDA À DIREITA)	23
FIGURA 12 - REGIÃO CRÍTICA DO TESTE t , PARA A MÉDIA DE UMA POPULAÇÃO, QUANDO A HIPÓTESE ALTERNATIVA CONTÉM O SÍMBOLO $<$ (TESTE COM CAUDA À ESQUERDA).....	23
FIGURA 13 - REGIÃO CRÍTICA DO TESTE t , PARA A MÉDIA DE UMA POPULAÇÃO, QUANDO A HIPÓTESE ALTERNATIVA CONTÉM O SÍMBOLO $\neq$ (TESTE COM DUAS CAUDAS)	24
FIGURA 14 - TESTE F DE UMA ÚNICA CAUDA (A DIREITA).....	25
FIGURA 15 - TESTE F COM DUAS CAUDAS	26
FIGURA 16 - CLASSES DE VEÍCULOS QUE TRAFEGAM PELA VIA WASHINGTON LUIZ	33
FIGURA 17 - DISTRIBUIÇÃO DE TIPOS DE VEÍCULOS NA VIA WASHINGTON LUIZ EM VEÍCULOS POR DIA, CONTAGENS DE UM DIA EM JUNHO, JULHO E AGOSTO DE 1995	34
FIGURA 18 - DISTRIBUIÇÃO DE TIPOS DE VEÍCULOS POR FAIXA DE TRÁFEGO NA VIA WASHINGTON LUIZ, SENTIDO SÃO PAULO, EM VEÍCULOS POR DIA, CONTAGENS DE UM DIA EM JUNHO, JULHO E AGOSTO DE 1995	34

FIGURA 19 - DISTRIBUIÇÃO DE TIPOS DE VEÍCULOS POR FAIXA DE TRÁFEGO NA VIA WASHINGTON LUIZ, SENTIDO INTERIOR, EM VEÍCULOS POR DIA, CONTAGENS DE UM DIA EM JUNHO, JULHO E AGOSTO DE 1995	35
FIGURA 20 - DISTRIBUIÇÃO DE TIPOS DE VEÍCULOS NA VIA WASHINGTON LUIZ, EM VEÍCULOS POR DIA, CONTAGENS DE UM DIA EM JUNHO, JULHO E AGOSTO DE 1995	35
FIGURA 21 - DISTRIBUIÇÃO DE TIPOS DE VEÍCULOS COMERCIAIS POR FAIXA DE TRÁFEGO NA VIA WASHINGTON LUIZ, SENTIDO SÃO PAULO, EM VEÍCULOS POR DIA, CONTAGENS DE UM DIA EM JUNHO, JULHO E AGOSTO DE 1995	36
FIGURA 22 - DISTRIBUIÇÃO DE TIPOS DE VEÍCULOS COMERCIAIS POR FAIXA DE TRÁFEGO NA VIA WASHINGTON LUIZ, SENTIDO INTERIOR, EM VEÍCULOS POR DIA, CONTAGENS DE UM DIA EM JUNHO, JULHO E AGOSTO DE 1995	36
FIGURA 23 - COTAS NAS TRILHAS DE RODA DA VIA WASHINGTON LUIZ, KM 222, SENTIDO SÃO PAULO	39
FIGURA 24 - COTAS NAS TRILHAS DE RODA DA VIA WASHINGTON LUIZ, KM 220, SENTIDO INTERIOR	39
FIGURA 25 - ESTIMATIVAS DE ACELERAÇÃO VERTICAL (BASE DE 1,00M) VIA WASHINGTON LUIZ, KM 220, SENTIDO INTERIOR	41
FIGURA 26- ESTIMATIVAS DE ACELERAÇÃO VERTICAL (BASE DE 2,50M). VIA WASHINGTON LUIZ, KM 220, SENTIDO INTERIOR.	41
FIGURA 27- ESTIMATIVAS DE ACELERAÇÃO VERTICAL (BASE DE 1,00M) VIA WASHINGTON LUIZ, KM 222, SENTIDO SÃO PAULO	42
FIGURA 28 - ESTIMATIVAS DE ACELERAÇÃO VERTICAL (BASE DE 2,50M). VIA WASHINGTON LUIZ, KM 222, SENTIDO SÃO PAULO.	42
FIGURA 29 - MÉDIAS DE ACELERAÇÕES VERTICAIS ESTIMADAS (BASE 1M)	45
FIGURA 30 - DESVIOS PADRÕES DE ACELERAÇÕES VERTICAIS MÉDIAS ESTIMADAS (BASE DE 1M)	46
FIGURA 31 - MÉDIAS DE ACELERAÇÕES VERTICAIS ESTIMADAS (BASE 2,5M)	47
FIGURA 32 - DESVIOS PADRÕES DE ACELERAÇÕES VERTICAIS MÉDIAS ESTIMADAS (BASE DE 2,5M)	47

Lista de tabelas

TABELA 1 - ESPECIFICAÇÕES DO DNER PARA AVALIAÇÃO DE PAVIMENTOS (DNER, 1978A, 1978B, 1978C, 1979, 1983A, 1986).....	5
TABELA 2 - LOCALIZAÇÃO DE TRILHAS A SEREM NIVELADAS CONFORME A NORMA DNER ES 173/86	11
TABELA 3 - NOTAÇÃO PARA INFERÊNCIAS SOBRE DUAS VARIÂNCIAS EM POPULAÇÕES	24
TABELA 4 - NOTAÇÃO PARA O ESTUDO, A PARTIR DE AMOSTRAS, DE PARÂMETROS SOBRE MÉDIAS.....	27
TABELA 5 - DESCRIÇÃO DOS SEGMENTOS ESTUDADOS.....	30
TABELA 6 - FATOS E CRONOLOGIA DE PAVIMENTO NA RODOVIA WASHINGTON LUIZ.....	31
TABELA 7 - DISTRIBUIÇÃO DE TRÁFEGO NA VIA WASHINGTON LUIZ.....	33
TABELA 8 - RESUMO DE ESTATÍSTICA DESCRITIVA DE DADOS DE TRÁFEGO NA VIA WASHINGTON LUIZ.....	37
TABELA 9 - ESTATÍSTICA DESCRITIVA DA ACELERAÇÃO VERTICAL MÉDIA (BASE DE 1.00M), FAIXA DE TRÁFEGO EXTERNA.....	43
TABELA 10 - ESTATÍSTICA DESCRITIVA DA ACELERAÇÃO VERTICAL MÉDIA (BASE DE 1.00M), FAIXA DE TRÁFEGO INTERNA	43
TABELA 11 - ESTATÍSTICA DESCRITIVA DA ACELERAÇÃO VERTICAL MÉDIA (BASE DE 2.5M), FAIXA DE TRÁFEGO EXTERNA.....	44
TABELA 12 - ESTATÍSTICA DESCRITIVA DA ACELERAÇÃO VERTICAL MÉDIA (BASE DE 2.5M), FAIXA DE TRÁFEGO INTERNA.....	44
TABELA 13 - MÉDIAS E VARIÂNCIAS DA ACELERAÇÃO VERTICAL MÉDIA (BASE DE 1M)	48
TABELA 14 - MÉDIAS E VARIÂNCIAS DA ACELERAÇÃO VERTICAL (BASE DE 2,5M)	49
TABELA 15 - TESTE DE HIPÓTESES SOBRE ACELERAÇÃO VERTICAL MÉDIA (BASE DE 1M).....	51
TABELA 16 - ANÁLISE ESTATÍSTICA DA ACELERAÇÃO VERTICAL (BASE DE 2,5M)	52
TABELA 17 - ANÁLISE ESTATÍSTICA DO QUOCIENTE DE IRREGULARIDADE.....	53
TABELA 18 - ANÁLISE ESTATÍSTICA DE DIFERENÇAS DE MÉDIAS DE QUOCIENTES DE IRREGULARIDADE.....	54

Resumo

Relatam-se conclusões obtidas ao cumprir uma tentativa de mostrar que a classificação e a contagem de veículos, estudos sobre distribuição de irregularidade na superfície de pavimentos podem contribuir para explicar diferenças de desempenho de pavimentos em faixas de tráfego distinta de rodovias. Adotaram-se para análise dados coletados em um caso real e importante para a economia de recursos aplicados na manutenção de rodovias, a via Washington Luiz, nas proximidades de São Carlos SP, Brasil: foram estudados onze trechos, e isso forneceu informações e resultados de testes de hipóteses que contribuem para sugerir que o estudo de irregularidade de superfície pode fornecer uma classificação de pavimentos de faixas distintas de rodovias. As bases teóricas usadas são conceitos para análise de comportamento de pavimentos sugeridos pela AASHO, a partir de análises sobre dados obtidos na operação de pesquisas sobre a pista experimental da AASHO e aplicações de estatísticas para testes de hipóteses. Conclui-se que as médias de acelerações verticais e quociente de irregularidade nas faixas de tráfego externas da via são diferentes das médias nas faixas internas, e que as variâncias são maiores - isso indicou maiores desgaste e variabilidade de distorção de irregularidade na superfície de pavimentos da faixa de tráfego externa. O trabalho contém sugestões para continuação de pesquisas e análises.

Abstract

This study is an attempt to prove that the roughness from the different lanes of a road can be explained by the number and type of vehicles, the roughness distribution on the pavement surface, and deflections produced by traffic. The analyses have been conducted with actual data from the Washington Luiz highway, in which savings in maintenance operations can play a very important role. Eleven sections of the highway have been studied in the region near the city of São Carlos - SP, Brazil, giving the necessary information to infer that the study of roughness on road surfaces can be used to determine a classification of pavement from distinct road lanes. The theory that support the analyses is originated from the AASHO ROAD TEST and statistical inference. The main conclusions are that the mean and the standard deviation of vertical acceleration and roughness index from the external road lane are greater than those parameters from the internal lane - this indicates greater distress and variations on the external roadway lane. The work also suggests some items to go away with research on pavement management.

I. Introdução

As ações de contato entre o pneu e o pavimento durante a passagem de veículos pela via serão aqui genericamente chamadas de “*rolamento de veículos pela superfície do pavimento*”, ou “*rolamento*”.

Irregularidade é o desvio de pontos da superfície de pavimento de rodovia em relação a um plano de referência [DNER - ES - 173 (1986), página 02; DNER (1986)]. A irregularidade afeta a dinâmica e a qualidade de rolamento de veículos e as ações de cargas dinâmicas transmitidas à via. A irregularidade pode também ser chamada de *rugosidade*.

O objetivo desse trabalho é relatar conclusões obtidas durante a execução das atividades de um roteiro de estudos visando cumprir uma tentativa para mostrar que: *classificação e contagem de veículos, estudos sobre distribuições de irregularidade na superfície de pavimentos podem contribuir para explicar diferenças de desempenho de pavimentos em faixas de tráfego distintas de rodovias.*

Espera-se que os resultados da aplicação de conclusões aqui emitidas, possam fornecer informações que contribuam à pesquisa sobre o comportamento de pavimentos, por colocar em análise e discussão a aplicação do conceito de capacidade para servir de pavimento - uma maneira particular para classificar o atendimento ao cliente de rodovias, ou verificar o nível de qualidade do rolamento de veículos.

A irregularidade na superfície de pavimentos - por exemplo, defeitos e afundamento nas trilhas de roda de faixas de tráfego - são produtos de ações de cargas aplicadas pela passagem de rodas de veículos, associados ao número de repetições e pesos por eixo da frota que circula por dada via.

Para avaliar a irregularidade dever-se-ia defini-la por completo: o conjunto de distorções transversais, longitudinais e horizontais das vias. A irregularidade pode gerar acelerações verticais e laterais. Mas a aceleração vertical é a principal componente de solicitações ao veículo nas sensações de conforto.

HASS, HUDSON, ZANIEWSKI (1994), página 79, definem irregularidade como "um processo vivido por motoristas e passageiros de veículos quando trafegam pela superfície de pavimento". A definição de irregularidade inclui a necessidade de um método para medida e análise de resultados, através de escalas que poderiam fixar graus de severidade para a irregularidade.

A demonstração da tese proposta é possível, porque conseqüências de volumes de solicitações diferentes às faixas de tráfego em vias podem ser visíveis através de análise de resultados de observações sobre o comportamento e o desempenho de pavimentos - por exemplo, as faixas externas de vias com duas faixas de tráfego e sentido único de circulação, desgastam-se mais que as internas.

As pesquisas foram efetuadas através de análise de dados coletados em um caso real e importante para a economia de recursos aplicados na manutenção de rodovias, a Via Washington Luiz, nas proximidades de São Carlos SP, Brasil. Foram estudados onze trechos da rodovia, nas proximidades do quilômetro 220.

Durante o andamento dos trabalhos mostrou-se que:

- a) Há uma sensível diferença entre o número de veículos comerciais que trafegam pelas faixas de tráfego externa e interna da via Washington Luiz;
- b) A média e a variância de acelerações verticais durante a passagem de veículos são diferentes nas faixas interna e externa da via, sendo maiores a média e a variabilidade de solicitações na faixa de tráfego externa;
- c) Os dados sobre cotas de superfície do pavimento, levantados durante as pesquisa em campo, permitiram a estimativa de quocientes de irregularidade, que são diferentes para as faixas interna e externa na Washington Luiz.

1.1 Conceitos sobre estudos de comportamento de pavimentos

Diz-se que um pavimento serve ao tráfego de veículos quando, do ponto de vista dos condutores, o rolamento desses mesmos veículos é suave, seguro e confortável.

Dentre os principais conceitos úteis para análise de comportamento de pavimentos estão os sugeridos pela AASHO, a partir de análises sobre dados obtidos na operação e pesquisas sobre a pista experimental da AASHO [CAREY & IRICK (1960), página 42; AASHO (1962), páginas 292 e 293]. Assim:

- a) “*Capacidade para servir*” ou “*Present Serviceability*” [CAREY & IRICK (1960), página 42; AASHO (1962), páginas 292 e 293], ou simplesmente “serventia” de pavimento, é o potencial de uma seção desse pavimento de servir ao tráfego de automóveis, caminhões e ônibus” em velocidade - definição válida para o instante presente, e não para o futuro, ou o passado.

No Brasil, adota-se “*serventia atual*” [DNER-PRO 07-78, DNER (1978a), item “2 Definições”] para nomear o conceito definido acima - “é a capacidade de um trecho específico de pavimento de proporcionar, na opinião do usuário, rolamento suave e confortável em determinado momento, para quaisquer condições de tráfego”;

- b) “*Estimativa de capacidade para servir por um indivíduo*”; “individual present serviceability rating” é uma estimativa independente, efetuada por um indivíduo, de capacidade para servir do pavimento em um trecho de rodovia, efetuada marcando um valor específico, numa escala específica para isso (Figura 1).

ACEITÁVEL?		
Sim	☐	5
		4
Não	☐	3
		2
Indeciso	☐	1
		0
		ÓTIMO
		BOM
		REGULAR
		RUIM
		PÉSSIMO
Identificação da Seção:		NOTA:
Avaliador:		
Data:	Hora:	Veículo:

Figura 1 - Escala para estimativa de capacidade individual de serviço de rodovias

Fonte: [AASHO (1962), página 292]

Essa estimativa exclui a opinião de usuário sobre a aceitação da qualidade de rolamento de veículo pelo trecho avaliado, e das proximidades da seção de pavimento percorrida, acostamentos, largura de faixa, greide, alinhamento e estética ambiental.

No Brasil, o *termo definido acima não tem equivalente* em Norma do DNER [ver DNER-PRO 07-78, DNER (1978a), página 1, item 2 - Definições];

- c) "*Estimativa de índice de capacidade para servir*" ou "Present Serviceability Rating", abreviado em inglês "PSR", é uma estimativa da média de índices de capacidade para servir de um trecho de rodovia obtido a partir de "valores de capacidade para servir" estimados por um conjunto de indivíduos - no original [CAREY & IRICK(1960), página 42], "escolhidos pelo Highway Research Board", e posteriormente generalizado para uso em estudos e pesquisas sobre comportamento de pavimentos.

Essa média, dependendo dos indivíduos que façam as estimativas individuais, é, cada uma, um "índice de capacidade para servir, individual". E, pode representar um vasto cabedal de interesses, como os de usuários, de administradores para rodovias, de empresas para manutenção, de comerciantes para materiais usados na construção. Também, representariam as relações entre as solicitações aos pavimentos, a educação para tráfego e trânsito, condições de veículos, qualidade de projeto para a via, e o estado de arte de tecnologia aplicada.

No Brasil, adota-se "*valor de serventia atual*", abreviado "VSA" [DNER-PRO 07-78, DNER (1978a), página 1, item "2 Definições"] para nomear o conceito "*estimativa de índice de capacidade para servir*" definido acima;

- d) "*Índice de capacidade para servir*" ou "*Present Serviceability Index*", abreviado em inglês "PSI", é uma combinação matemática de valores obtidos a partir de medidas físicas em um conjunto de seções de pavimentos, visando a previsão do PSR para pavimentos, dentro de determinadas hipóteses.

No Brasil, adota-se "*índice de serventia atual*", abreviado "ISA", [DNER-PRO 07-78, DNER (1978a), página 1, item "2 Definições"] para nomear o conceito definido acima - mas o DNER expõe uma definição vaga para esse índice: "é a medida objetiva de serventia atual, na mesma escala do VSA, feita com aparelhagem apropriada";

- e) "*Tendência de capacidade para servir*", ou "*Serviceability Trend*" [AASHO (1962), páginas 292 e 293], é a curva obtida em um gráfico que tem o número de repetições de eixo padrão para dimensionamento em abcissas, e o "índice de capacidade para servir" em ordenadas.

No Brasil, os procedimentos do DNER [ver Tabela 1] não se referem à "tendência de capacidade para servir".

Infelizmente, na década dos 60, o vocabulário usado colocava “gráfico” para exprimir “função”, ou a “curva que representasse em um sistema de eixos cartesianos as relações que pares de variáveis tivessem entre si” - hoje deveríamos escrever a mesma idéia usando termos e símbolos diferentes que facilitem o uso, o entendimento e explicações de conceitos matemáticos e estatísticos sobre as relações entre repetições de carga e índice de capacidade para servir - ou seja, por exemplo, “tendência” seria “a expressão algébrica de uma função.....!!!”;

- f) “Desempenho de pavimento”, ou simplesmente “Desempenho”, ou “Performance”, [AASHO (1962), páginas 292 e 293] é a tendência de “índice de capacidade para servir” para uma seção de pavimento em função do número de repetições de aplicações de carga equivalente ao eixo padrão para dimensionamento.

Tabela 1 - Especificações do DNER para avaliação de pavimentos
(DNER, 1978a, 1978b, 1978c, 1979, 1983a, 1986)

Referência	Assunto
DNER - TER 08 - 1978	Define os termos empregados em defeitos que ocorrem nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos
DNER - PRO 07 - 1978	Fixa as condições exigíveis na avaliação da superfície de pavimentos com base no valor da serventia atual
DNER - PRO 08 - 1978	Fixa as condições exigíveis na avaliação de pavimentos rodoviários dos tipos flexíveis e semi-rígidos, mediante a contagem e classificação de ocorrências aparentes e de medidas das deformações
DNER - PRO 10 - 1979	Estabelece os procedimentos necessários para a avaliação estrutural de pavimentos flexíveis existentes, aponta as causas de suas deficiências e fornece elementos para o cálculo da vida restante de um pavimento
DNER - PRO 128 - 1983	Define o procedimento a ser utilizado no levantamento da condição de superfície de segmentos testemunha de rodovias
DNER - ES 173 - 1986	Define o procedimento a ser aplicado na levantamento de irregularidade de segmentos de rodovia através do método do nível e mira.

1.2 A formulação teórica adotada

Desde o início do século, os estudiosos de física associada ao movimento de veículos vêm tentando identificar a influência de forças e acelerações nas sensações de conforto que usuários de transportes relatam sobre o tráfego pelas vias. E isso introduziu entre os técnicos a conclusão de que passageiros e condutores associam o conforto ao rolamento de veículos com as acelerações verticais a que são submetidos. Ou, que as solicitações à via atribuídas ao rolamento, à própria via e aos veículos, são funções dessas acelerações. Resultados de ações de irregularidade de superfície de pavimento podem ser associados às acelerações verticais de veículo em movimento.

Pesquisadores sobre irregularidade [HASS, HUDSON, ZANIEWSKI (1994) páginas 81 a 107] vêm tentando generalizar os índices, métodos e processos para estudo da irregularidade. Isso tem levado a diversas vertentes na obtenção e processamento de dados sobre as relações entre a irregularidade e o conforto nas vias.

A irregularidade pode ser medida no campo por levantamentos diretos sobre a superfície do pavimento, ou processada através de aparelhos de resposta mecânica - destacam-se entre eles os RTRRMS, "reponse type road roughness measuring systems", "medidores de irregularidade tipo resposta" - equipamentos que medem a amplitude de movimento relativo entre o corpo de veículo e o eixo, ou usam acelerômetros para medir respostas ao movimento de corpo ou eixo de viaturas. Isso mede indiretamente as solicitações de veículo pela irregularidade.

No Brasil [DNER PRO 159/85, DNER (1985)] recomenda-se a medida de irregularidade por aparelhos medidores de irregularidade do tipo resposta - tais como o "Integrador IPR/USP" ou o Maysmeter. "As leituras devem ser fornecidas a um intervalo de 200m e 400m, sendo normalmente adotado o intervalo constante de 320m". O RTRRMS é nomeado AMITR (aparelho medidor de irregularidade tipo "resposta"), e deve "ser calibrado com o método de nível e mira", conforme QUEIROZ (1984) - convém recordar que em 1986, isso foi normalizado pela especificação de serviço DNER ES 173/86 [DNER (1986)].

Figura 2 - Medidor de rugosidade BPR

A Figura 2 ilustra o "medidor de rugosidade BPR", uma das mais importantes contribuições à medida de irregularidade introduzidas pelo Bureau of Public Roads.

A Figura 3 ilustra o mais popular dos medidores de irregularidade tipo resposta usado nos Estados Unidos, o Mays Ride Meter, "Maysmeter", desenvolvido pelo Texas Highway Department na década dos 60 - trata-se de uma haste acoplada ao eixo de um veículo e a um transmissor no corpo do veículo.

Figura 3 - O Maysmeter

As cotas que representariam o perfil longitudinal da superfície de um pavimento são alturas que não podem ser usadas diretamente para o estudo da irregularidade; devem ser processadas e filtradas de alguma maneira para produzir uma representação inteligível da irregularidade de pavimentos. Segundo HUTCHINSON (1965) as primeiras tentativas de resposta a essa questão usavam técnicas para filtragem digital que tinham o objetivo de identificar comprimentos e amplitudes de ondas que descrevessem a irregularidade. HUDSON (1984) relata que dentre principais produtos estão: a simulação tipo quarter-car, e a aceleração vertical média quadrática.

A simulação tipo quarter-car foi desenvolvida visando simular as respostas obtidas com o medidor de rugosidade BPR. A Figura 4 ilustra o modelo para simulação das solicitações em um medidor de rugosidade BPR conforme GILLESPIE et al. (1980).

Figura 4 - O modelo quarter-car

O modelo adotado no "quarter-car" constitui-se de uma massa móvel (o corpo de veículo), uma suspensão móvel com amortecedor e um conjunto fixo (suspensão, pneu e eixo) e uma constante elástica do pneu. Se:

z é uma cota de um ponto na superfície do pavimento;
 z_u é a cota da massa fixa (eixo, etc.);
 z_s é a cota da massa móvel (corpo do veículo);
 k_p é a constante elástica do pneu;
 k_s é a constante elástica da suspensão;
 C_s é constante de absorção de choque;
 M_u é massa fixa (eixo, etc);
 M_s é a massa móvel.

E, usando-se "·" (ponto) como notação para primeira derivada, e "··" (dois pontos), para notação da segunda derivada, então:

$$M_s \ddot{z}_s + C_s \left(\ddot{z}_s - \dot{z}_u \right) + k_s (z_s + z_u) = 0, \quad e,$$

$$M_s \ddot{z}_s + C_s \ddot{z}_u + k_s (z_u + z) = 0$$

O parâmetro estatístico para controle obtido por integração das equações anteriores é conhecido por QCS:

$$QCS = \frac{1}{C} \int_0^T \left| \dot{z}_s - \dot{z}_u \right| dt$$

Hoje a integração da expressão acima exposta é simples porque há muitos programas de computador que podem processar dados com simplicidade.

HASS, HUDSON, ZANIEWSKI (1994), ao comentar as teorias associadas, e descrever medidores de irregularidades de superfícies de pavimentos, relatam e analisam a dedução clássica para a obtenção da "root mean square vertical acceleration - RMSVA", "aceleração vertical média quadrática" - ao valor estimado para apenas uma observação, denominaremos "aceleração vertical durante o deslocamento ponto a ponto", ou mais simples ainda "aceleração vertical" - uma das principais informações que podem ser usadas durante estudos sobre relações entre as sensações de conforto e segurança com o rolamento de veículos do ponto de vista de motoristas, a capacidade para servir.

Uma representação simples do perfil longitudinal da superfície do pavimento pode ser resumida conforme na Figura 5.

Figura 5 - Perfil longitudinal de pavimento para análise da aceleração vertical

A aceleração vertical é usada para estudos sobre o medidor de irregularidade de superfície de pavimentos conhecido por Maysmeter, ou a influência da distância entre eixos, ou pontos de apoio de equipamentos para estimativa da irregularidade HASS, HUDSON, ZANIEWSKI (1994), SRINIWARAT (1982); McKENZIE (1982)] - análises que podem ser consideradas como as principais tentativas de obtenção de índices de capacidade para servir generalizados, muitos dos quais já em uso nos Estados Unidos, com eficiência. McKENZIE (1978, 1982) usou a análise espectral para medir acelerações verticais e calibrar medidores de irregularidade do tipo "resposta".

Assumindo que pontos de uma linha longitudinal da superfície de pavimento, $(X_1, X_2, \dots, X_n)$, igualmente espaçados, de espaçamento horizontal ΔS , e cotas $(Y_A, Y_B, \dots, Y_n)$, teríamos:

Declividade em A, porque θ é pequeno, é:

$$\frac{Y_A - Y_B}{\Delta S} = |\theta_1|$$

Declividade em B:

$$\frac{Y_C - Y_B}{\Delta S} = |\theta_2|$$

A variação de declividade é:

$$\theta_2 - (-\theta_1) = \theta_2 + \theta_1 = \Delta\theta$$

E,

$$\Delta\theta = \frac{Y_C - Y_B + Y_A - Y_B}{\Delta S}$$

A variação da declividade em relação à distância é:

$$\left(\frac{\Delta\theta}{\Delta S}\right)_B = \frac{(Y_C - Y_B) - (Y_B - Y_A)}{\Delta S^2}$$

A estimativa da segunda derivada, ou seja a *aceleração vertical* é:

$$\frac{\Delta\theta}{\Delta S}$$

$$\left[\sum_{i=2}^{n-1} \frac{\left(\frac{\Delta\theta}{\Delta S}\right)_i^2}{n-2} \right]^{0,5} = \sum_{i=2}^{n-1} \left[\frac{\{(Y_{i+1} - Y_i - (Y_i - Y_{i-1}))\}^2}{(n-2)\Delta S^4} \right]^{0,5}$$

Onde: n é o número de pontos da superfície de pavimento observados;

ΔS é o espaçamento entre os pontos analisados;

Y_i é a cota no ponto i .

Entretanto, para calibrar equipamentos, estudos e pesquisas específicos pode-se adotar o levantamento das elevações de perfil da superfície do pavimento através do uso de nível e mira. Para exemplo, o procedimento DNER-ES-173/86 [DNER (1986)].

O Departamento Nacional de Estradas de Rodagem - DNER e a Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes - GEIPOP efetuaram na década de 70 um conjunto de estudos para identificação de métodos e processos de determinação da irregularidade de pavimentos. Os resultados foram discutidos principalmente por QUEIROZ (1984), e, no que se refere ao levantamento com nível e mira, estão sintetizados na Norma DNER ES 173/86 [DNER (1986)].

A norma DNER ES 173/86 [DNER (1986)] define os processos, materiais e equipamentos para levantamento de irregularidade de trechos de rodovia através do método nível e mira. O método é proposto para calibrar medidores de irregularidade tipo resposta e medida de irregularidade em trechos de pavimentos.

Segundo o DNER ES 173/86 [DNER (1986)], a equipe de campo mínima fixada compõe-se de: 2 topógrafos, 1 porta-mira e 1 anotador.

Os aparelhos devem ser no mínimo:

- Nível ótico - com luneta interna e traços estadimétricos, com precisão de 1,5mm/km;
- Mira para nivelamento, comprimento de 2 a 4m , com nível de bolha, graduada em divisão de pelo menos meio centímetro, permitindo a leitura em milímetros, por interpolação;
- Trena de 50m, graduada em centímetros.

A Tabela 2 resume a localização das trilhas a serem niveladas na seção de pavimentos.

**Tabela 2 - Localização de trilhas a serem niveladas
conforme a norma DNER ES 173/86**

Largura da faixa de tráfego (m)	Distância da borda	
	Alinhamento externo	Alinhamento interno
2,70	0,45	1,85
3,00	0,60	2,00
3,30	0,75	2,15
3,50	0,90	2,30

Observação: Se a trilha externa já for definida pelo tráfego, considerá-la!

Fixa a Norma DNER ES 173/86:

- a) As estacas inteiras serão de 5 em 5m;
- b) As estacas intermediárias de 0,50 em 0,50m;
- c) Deve-se implantar uma referência de nível;
- d) O nível deve estar preferencialmente sobre o alinhamento a nivelar.

A unidade fixada para a irregularidade é o *QI*, nomeado quociente de irregularidade, expresso em *contagens/km*, e estimado, por:

$$QI = -8,54 + 6,17(VA_{1,0}) + 19,3(VA_{2,5})$$

Onde:

$VA_{1,0}$ é a aceleração vertical média quadrática, referente a uma distância de base igual a 1,00m;

$VA_{2,5}$, idem, quando a distância de base é 2,50m.

O termo *distância de base* é usado para referência aos comprimentos de onda que, nos estudos de análise de solicitações aos veículos e seus passageiros [GILLESPIE (1980)] passaram a ser adotados como padrão de estudos de irregularidade após os estudos com o modelo quarter-car.

E, se b é o comprimento da base; S é distância entre duas cotas consecutivas, N , o número de cotas levantadas:

$$VA_b = \left[\sum_{i=k+1}^{N-k} \frac{(SB_i)^2}{N-2k} \right]^{0.5}$$

Onde a estimativa da derivada segunda do espaço vertical no ponto i [QUEIROZ (1984), página 112], ou seja, aceleração vertical no ponto i , é dada por:

$$SB_i = \frac{Y_{i+k} - 2Y_i + Y_{i-k}}{(kS)^2}$$

Para Y_i = cota num ponto qualquer,

E,

$$k = \frac{b}{S}$$

Convém ressaltar que, segundo a especificação DNER ES 173/86 [DNER (1986)], o *QI* tem uma expressão matemática de estimativas de irregularidade, mas, segundo a especificação DNER PRO 159/85 [DNER (1985)], página 05/34, o *QI* é uma vaga referência "a irregularidade deve ser medida em ambas as faixas de tráfego por meio de medidores tipo resposta, tais como o Integrador IPR/USP ou o Maysmeter".

II. Conceitos de estatística aplicados nesse trabalho

Resumiremos a seguir os principais conceitos sobre estatística aplicados para análise dos dados coletados durante as pesquisas efetuadas para cumprir a tentativa de demonstrar a tese proposta nesse trabalho.

Estatística é a ciência que estuda, coleta, simplifica e descreve dados, e, também, as inferências obtidas através de análise desses dados e suas características.

Dentre os métodos da estatística destacam-se:

- a) A *estatística descritiva* é o conjunto de ações para coletar, simplificar e fornecer as principais propriedades dos dados;
- b) A *inferência estatística* é o conjunto de técnicas que pode ser utilizado para julgamentos sobre a população, a partir de propriedades observadas em amostras obtidas entre a população.

Chama-se:

- a) *Parâmetro estatístico*, ou simplesmente *parâmetro*, a uma propriedade numérica de população;
- b) Um número que representa uma propriedade estatística que caracterize elementos de uma amostra é chamado de *estatística*, ou *teste estatístico*.

O conjunto de todos os elementos (ou dados, ou valores atribuídos aos dados) a que pertencem os sujeitos de estudo é chamado de *população*, ou *universo*. Um subconjunto do universo, constituído de alguns elementos pertencentes à população é chamado *amostragem sobre a população*, ou simplesmente *amostra*.

Uma amostragem sobre uma população é dita *aleatória* quando as amostras obtidas têm o mesmo tamanho e igual probabilidade de ocorrer.

As amostragens podem ser:

- a) *Estratificadas*, quando a população é subdividida em subconjuntos, os *estratos*, e as amostras são extraídas de cada extrato;
- b) *Agrupadas* quando as amostras são obtidas a partir de alguns dos extratos de população;
- c) *Sistemáticas*, quando as amostras são um conjunto de elementos obtidos de uma lista dos membros de população através de um critério de seleção sequencial e em intervalos iguais a partir de um primeiro escolhido aleatoriamente;
- d) *De conveniência*, quando a amostragem já existe e está disponível para estudos - os elementos amostrados não foram escolhidos por critérios probabilísticos.

Ao analisar dados que expressem propriedades de uma variável característica de elementos de população, expressa através de números, diz-se que estão sendo analisados *dados numéricos sobre a população*, ou simplesmente *dados*. E, em grande parte das decisões sobre características de universos, usam-se conceitos provenientes da estatística e parâmetros que descrevem propriedades de elementos de população estudada.

Uma regra, ou método matemático, que permita associar um número a cada elemento de um *espaço de amostragem* sobre uma população é chamado *variável aleatória* sobre aquele espaço. Um número particular, associado a um elemento específico de amostra, pode ser chamado *dado ou valor atribuído* à variável aleatória característica do elemento no espaço de amostragem. Em um experimento, o *dado* é classificado como *observado*.

Uma variável aleatória é chamada *contínua* se pode assumir valores pertencentes ao conjunto de números reais em um intervalo. E, *discreta*, se os valores que podem ser assumidos são uma seqüência de números isolados. Uma variável aleatória contínua geralmente *mede* algo. A discreta, usualmente é produto de *contagem* de algo.

II.1 Distribuições de probabilidades

Se associarmos aos valores que podem assumir as variáveis aleatórias uma *probabilidade de ocorrência*, uma fórmula ou tabela que permita obter tais probabilidades é chamada de *distribuição de probabilidades* para a variável aleatória.

A especificação das probabilidades associadas aos valores que pode assumir uma variável aleatória discreta é chamado *distribuição de probabilidades discreta*. A probabilidade associada a um dado valor x de uma distribuição de probabilidades discreta tem a notação $P(x)$.

Dada uma variável aleatória discreta x , caracterizada por uma distribuição de probabilidades $P(x)$, a *média* da variável aleatória, μ , é definida como

$$\mu = \sum x \cdot P(x)$$

E, define-se, para essa variável x , a *variância* σ^2 ,

$$\sigma^2 = \sum (x - \mu)^2 \cdot P(x)$$

E, o *desvio padrão* σ , igual à raiz quadrada da variância,

$$\sigma = \sqrt{\sum (x - \mu)^2 \cdot P(x)}$$

Também, a *esperança matemática*, ou *valor esperado* para a variável x ,

$$E(x) = \mu = \sum x \cdot P(x)$$

A distribuições de probabilidades $f(x)$, para as variáveis aleatórias contínuas, são chamadas *distribuições de probabilidades contínuas*, e também, a função $f(x)$ é chamada *função densidade de probabilidades*.

Convém comentar que as técnicas para obter as funções de densidade de probabilidade para variáveis contínuas foram desenvolvidas pelos estatísticos, e constituem-se em um conjunto complexo de deduções. Mas, as principais distribuições foram estudadas e os resultados expressos em tabelas e assemelhados. [por exemplo: CHASE & BOWN, (1992), apêndices A e B; SPIEGEL, (1977), páginas 561 a 568].

Atualmente, a maior parte dessas tabelas encontram-se anexas a programas para cálculos em computador e similares, facilitando-se sobremaneira o acesso a tais resultados úteis para a análise estatística (Por exemplo, o EXCEL, versão 7.0 da MICROSOFT, 1995; o STATISTICA, versão 4.3, da STATSOFT, 1994; MATHCAD 6.0 da MATHSOFT).

Nas distribuições de probabilidades contínuas temos:

- a) $f(x) \geq 0$, para todos os valores de x da variável aleatória;
- b) Se plotarmos a função $y = f(x)$, a área entre o eixo dos x e a curva que representa a função $f(x)$ é 1 ;
- c) A probabilidade de que um valor observado, x , esteja no intervalo definido por a e b é $P(a < x < b)$, definida pela área entre a e b , eixo dos x , e $f(x)$ [Figura 6].

Figura 6 - $P(a < x < b)$ = a área sombreada

A mais importante das distribuições de probabilidades contínuas é a *distribuição normal*, porque a maioria das variáveis que ocorrem na natureza pertencem a populações cujos elementos têm características que possuem essa distribuição.

A distribuição normal é definida pelos seguintes parâmetros:

- a) Função de *distribuição de probabilidades*:

$$f(x) = \frac{e^{-(x-\mu)^2/2\sigma^2}}{\sigma\sqrt{2\pi}}$$

- b) O gráfico da distribuição normal de probabilidades $f(x)$ tem a forma de um sino, com o pico $x = \mu$, e, é simétrico em relação a esse valor;
- c) A média tem um mesmo valor para toda a população normal.

Chama-se *variável normal estandardizada*, z , ou *escore z* , à variável de distribuição normal de média "0" e desvio padrão "1". Dados associados à distribuição normal de probabilidade são encontrados em tabelas de livros (CHASE & BOWN, tabelas B.3; SPIEGEL, 1977, apêndices I e II, etc), ou em programas de computador (EXCEL, MATHCAD e STATISTICA, etc).

As probabilidades associadas a uma variável normal podem ser obtidas usando a distribuição normal estandardizada, por *estimativa do escore z* :

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma}$$

II.2 Inferência estatística

A *inferência estatística* é o processo usual para fazer juízos sobre parâmetros de uma população a partir de propriedades estimadas sobre amostras. Há dois tipos de inferência estatística:

- a) A *estimativa de parâmetros*, ou seja, a aproximação de parâmetros descritivos de população (média, desvios padrão, etc.);
- b) E a *tomada de decisões*, mais conhecida como *teste de hipóteses*, que consiste em escolher entre duas afirmativas opostas sobre parâmetros de população. As afirmativas são chamadas *hipóteses*.

Um conjunto de amostras independentes sobre uma população, com n elementos cada, obtido de maneira que as amostras tenham igual probabilidade de ocorrer (likelihood) é chamado *amostragem aleatória*.

II.2.1 Estimativa de médias

A média $\bar{x}$, de dados obtidos em uma amostragem sobre dada população, é uma *estimativa por pontos da média de população*, μ .

O processo para *estimativa da média de população* leva a um intervalo de pontos onde pode estar contida essa média de população, o *intervalo de estimativa da média*, ou simplesmente *intervalo das médias*, e a probabilidade de ocorrência daquele parâmetro, característica do processo de estimativa usado. Essa probabilidade é chamada de *nível de confiança* $1-\alpha$, e, o intervalo resultante de *intervalo de confiança*.

Se, x é um conjunto de dados estimados sobre uma população caracterizada por uma média μ e desvio padrão σ ; e, $\bar{x}$ representa a média em uma amostragem definida por amostras aleatórias de tamanho n , nas estimativas de parâmetros sobre as populações o uso do *teorema do limite central* (CHASE & BOWN, 1992, páginas 264 a 275) facilita a obtenção das distribuições de probabilidades de ocorrência associáveis a $\bar{x}$, porque demonstra que:

- a) A média das médias sobre as amostras tenderá à média de população, $\mu_{\bar{x}} = \mu$;
- b) O desvio padrão poderá ser estimado a partir dos desvios das amostras, $\sigma_{\bar{x}} = \sigma / \sqrt{n}$;
- c) $\bar{x}$ terá distribuição aproximadamente normal quando n for maior que 30.

O escore z será estimado:

$$z = \frac{\bar{x} - \mu}{\sigma / \sqrt{n}}$$

O intervalo de confiança $1 - \alpha$ para a média μ de população, quando o número de elementos de amostras é $n \geq 30$ é estimado por

$$\bar{x} - z\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}} < \mu < \bar{x} + z\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

E, pode-se usar a notação simplificada $\bar{x} \pm z\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$ para o intervalo de confiança das médias.

A Figura 7 ilustra o intervalo de confiança das médias, quando $1 - \alpha$ é a probabilidade de que um intervalo construído dessa maneira contenha a média μ .

Figura 7 - Intervalo de confiança das médias

Indica-se por z de $\alpha/2 = z(\alpha/2)$ ao valor do escore z para o nível de confiança $1 - \alpha$.

O desvio padrão sobre a amostragem s é usado para estimativa do desvio padrão de população σ , quando o número de elementos das amostras é $n \geq 30$. Para aplicar o conceito de intervalo de confiança exposto a amostras com menos que 30 elementos, é indispensável conhecer o desvio padrão, σ , de população.

Ao estimar a média de população, μ , a partir de médias de amostras grandes, $\bar{x}$, o máximo erro de estimativa, com nível de confiança $1 - \alpha$, é

$$E = z\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

Os pontos extremos do intervalo de confiança podem ter a notação $x \pm E$.

Também, erro de estimativa, E , pode ser usado para estimar o tamanho mínimo de uma amostra necessário para, durante uma amostragem, ocorrer um *erro máximo especificado* E :

$$n = \left[\frac{z(\alpha/2) \cdot \sigma}{E} \right]^2$$

II.2.2 O teste de hipóteses

Segundo CHASE & BOWN (1992), páginas 313 a 334:

- a) A tomada de decisões sobre populações, mais conhecida como *teste de hipóteses*, consiste em escolher entre duas afirmativas opostas sobre a população - uma provavelmente verdadeira, e outra falsa. Essas afirmativas são chamadas *hipóteses*;
- b) Chama-se *hipótese nula* à afirmativa que contém informações sobre *nenhum efeito, mudança, ou diferença entre características de elementos de população*. Trata-se de uma sentença cujos sujeitos são parâmetros de população, e que contém uma igualdade (*senal de =*). A notação adotada para a hipótese nula é H_0 ;
- c) Chama-se *hipótese alternativa* uma afirmativa que se admite seja verdadeira, em oposição à hipótese nula. Esse tipo de sentença contém afirmações sobre parâmetros de população que *estabeleceriam diferenças entre características de elementos de população* (*sinais $\neq, >, <$*).
- d) A notação usual para as hipóteses alternativas é H_1 .

Um número usado para tomar decisões em um teste de hipóteses é chamado *teste estatístico*. Por exemplo, o escore z associado à média obtida por amostragem, $\bar{x}$, e, ao desvio padrão, σ , de uma população.

Chama-se *região crítica de um teste de hipótese*, ou simplesmente *região crítica*, aos valores de um teste estatístico que fornece fortes evidências em favor da aceitação da hipótese alternativa. Ou seja, *os valores na região crítica sugerem a rejeição de validade da hipótese nula*.

Se, a hipótese nula for verdadeira, a *probabilidade de que um teste estatístico pertença à região crítica* é chamada de *nível de significância* do teste, α .

Embora não seja desejável que o valor de um teste estatístico pertença à região crítica quando H_0 é verdadeira, isso pode ocorrer. Aí, rejeita-se H_0 de maneira errada. A probabilidade de ocorrência do erro desse tipo é α :

$$\alpha = P(\text{De hipótese ser rejeitada, quando deveria ser aceita})$$

O outro tipo de erro que se pode cometer é aceitar H_0 , quando esta for falsa. Esse tipo de erro ocorre quando o valor do teste estatístico não pertence à região crítica e a hipótese nula H_0 é, de fato, falsa. A notação adotada para a probabilidade de ocorrer esse tipo de erro é β . Embora α seja sempre estimável, β é *usualmente desconhecido*.

O roteiro usual para os testes de hipótese é:

- a) *Identificar a hipótese nula, H_0 , e a hipótese alternativa, H_1 - que serão usualmente conjecturas (suspeitas ou crenças) sobre um, ou mais, parâmetros de população;*
- b) *Escolher α , o nível de significância. O valor de α é usualmente pequeno, $\alpha \leq 0,10$;*
- c) *Escolher o teste estatístico e estimar seu valor a partir dos dados observados - o valor estimado é chamado valor observado, ou estimativa, do teste estatístico;*
- d) *Determinar a região crítica - as dimensões da região crítica são uma função do nível de significância α ;*
- e) *Testar a hipótese - caso o valor do teste estatístico pertença à região crítica, rejeitar H_0 , em favor da hipótese alternativa. Diz-se que os resultados são estatisticamente significantes.*

Se o valor do teste não pertence à região crítica, falhou-se ao rejeitar H_0 - *não há evidências suficientes para rejeitar a hipótese nula* - deve-se decidir em linguagem de leigos, porque não é possível usar o vocabulário técnico.

II.2.3 O teste z , para a média de uma população, a partir de grandes amostras

Assumindo-se que:

- a) A população tem distribuição normal, ou aproximadamente normal;
- b) Tamanho de amostra adotada (n) é maior que 30;
- c) E o desvio padrão de população (σ) é conhecido, ou pode ser estimado a partir do desvio padrão estimado na amostragem, s ;

d) Para testar hipóteses sobre a média μ , a partir de grandes amostras, usa-se o teste estatístico:

$$z = \frac{\bar{x} - \mu}{s / \sqrt{n}}$$

Esta estatística tem a distribuição do *aproximadamente normal*. Substitui-se μ , pelo valor atribuído à média na hipótese nula. O *valor observado para z* é estimado usando dados provenientes de amostragem.

Caso z pertença à região crítica, rejeite-se a hipótese H_0 . Se α é o nível de significância do teste, as regiões críticas podem ser descritas, em resumo, nas Figura 8, Figura 9, e Figura 10.

Figura 8 - Teste z , para a média de uma população, quando a hipótese alternativa contém o símbolo $>$. (Teste para cauda à direita)

Figura 9 - Teste z para a média de uma população, quando a hipótese alternativa contém o símbolo $<$ (teste para cauda à esquerda)

Figura 10 - Teste z para a média de uma população, quando a hipótese alternativa contém o símbolo $\neq$ (teste com duas caudas)

II.2.4 Estimativa de intervalos de confiança de médias a partir de grandes amostras

Segundo CHASE & BOWN (1992), páginas 292 a 301:

Se α é o nível de significância do experimento, $1 - \alpha$ é *intervalo de confiança para a média* (quando a amostra é grande), para uma população de distribuição normal, ou aproximadamente normal, o *intervalo de confiança* $1 - \alpha$ da *média de população*, μ , é dado por

$$\bar{x} \pm z\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot \frac{s}{\sqrt{n}}$$

E, ao estimar a média μ , a partir de $\bar{x}$, o *erro máximo de estimativa*, com a confiança, $1 - \alpha$, é

$$E = z\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot \frac{s}{\sqrt{n}}$$

II.2.5 O teste t para estimativas da média de população

Segundo CHASE & BOWN, (1992), página 354, sob o pseudônimo de *Student*, em 1908, Gosset introduziu o uso do teste t , uma *variável aleatória*, para análise de *parâmetros de populações* a partir de amostras pequenas. Se a população tem média μ ; a amostra, n elementos e média $\bar{x}$ e desvio padrão s :

$$t = \frac{\bar{x} - \mu}{s / \sqrt{n}}$$

Dentre as propriedades da distribuição do t de *Student* destacam-se:

- Existem infinitas distribuições t , associáveis ao número de graus de liberdade - o que mais se utiliza, entretanto tem $n - 1$ graus de liberdade;
- A forma da curva da distribuição t é similar à distribuição normal;
- Para $n \geq 30$, a distribuição t é aproximadamente normal.

Assumindo-se que:

- a) A população tem distribuição normal, ou aproximadamente normal;
- b) Tamanho de cada amostra adotada (n) é menor que 30;
- c) E o desvio padrão de população (σ) é desconhecido.

Para testar hipóteses sobre a média μ , usa-se o teste estatístico t de *Student observado*, obtido substituindo-se μ , pelo valor atribuído à média na hipótese nula - o *valor observado para t* é estimado usando dados de amostragem. Esta estatística tem a distribuição do t de *Student*, com $n - 1$ graus de liberdade.

Caso t caia na região crítica, rejeite-se a hipótese H_0 . Se α é o nível de significância do teste, as regiões críticas podem ser descritas, em resumo, conforme nas Figura 11, Figura 12 e Figura 13.

Figura 11 - Região crítica do teste t , para a média de uma população, quando a hipótese alternativa contém o símbolo $>$ (teste para cauda à direita)

Figura 12 - Região crítica do teste t , para a média de uma população, quando a hipótese alternativa contém o símbolo $<$ (teste com cauda à esquerda)

Figura 13 - Região crítica do teste t , para a média de uma população, quando a hipótese alternativa contém o símbolo $\neq$ (teste com duas caudas)

Observação: Quando se conhece o desvio padrão σ , pode-se usar o teste z , da distribuição normal durante as decisões sobre as médias de população.

$$\bar{x} \pm t\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot \frac{s}{\sqrt{n}}$$

E, ao estimar a média μ , a partir de $\bar{x}$, o erro máximo de estimativa, com a confiança $1 - \alpha$ é

$$E = t\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot \frac{s}{\sqrt{n}}$$

II.2.6 Inferências sobre duas variâncias em populações - o teste F

Nos estudos que se seguem usaremos a notação exposta na Tabela 3.

Tabela 3 - Notação para inferências sobre duas variâncias em populações

População	Tamanho de amostragem	Variância de amostragem	Variância sobre a população	Graus de liberdade
1	n_1	s_1^2	σ_1^2	$n_1 - 1$
2	n_2	s_2^2	σ_2^2	$n_2 - 1$

Segundo CHASE & BOWN (1992), páginas 400 a 407:

Há casos, onde o objetivo de estudos sobre parâmetros de populações é comparar estimativas diferentes de variâncias. Adotando-se a notação expressa na Tabela 3, e admitindo que as amostras são independentes entre si, define-se o teste estatístico F :

$$F = \frac{s_1^2}{s_2^2}, \text{ com o número de graus de liberdade } [(n_1 - 1), (n_2 - 1)].$$

Dentre as propriedades da distribuição de F , destacamos:

- a) Há infinitas distribuições F , para cada par de graus de liberdade;
- b) O gráfico da distribuição F começa em zero e estende-se infinitamente para a direita. A área entre o eixo dos x e a curva da distribuição tem área 1.

Admitindo-se: A notação da Tabela 3; e que $s_1^2 > s_2^2$, e, ainda, que o nível de significância é α :

- a) O teste da variância para uma única cauda é efetuado:

$$H_o: \sigma_1^2 = \sigma_2^2$$

$$H_1: \sigma_1^2 > \sigma_2^2$$

O valor observado de F é estimado a partir dos dados de amostragem.

Se $F \geq F(\alpha)$, rejeitamos H_o .

A Figura 14 ilustra a região crítica do teste F para duas variâncias.

Figura 14 - Teste F de uma única cauda (a direita)

b) O teste de variâncias para duas caudas é efetuado:

$$H_o: \sigma_1^2 = \sigma_2^2$$

$$H_1: \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$$

O valor observado de F é estimado a partir dos dados de amostragem.

Se $F \geq F(\alpha/2)$, rejeitamos H_o .

A Figura 15 ilustra a região crítica do teste F para variâncias.

Figura 15 - Teste F com duas caudas

O intervalo de confiança $1 - \alpha$, para $\frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2}$, é estimado:

$$\frac{s_1^2}{s_2^2} \cdot \frac{1}{F(\alpha/2)} < \frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2} < \frac{s_1^2}{s_2^2} \cdot \frac{1}{F(1-\alpha/2)}$$

II.2.7 Inferências sobre duas médias de populações. Grandes amostras independentes

A notação que usaremos a partir desse item é resumida na Tabela 4.

Tabela 4 - Notação para o estudo, a partir de amostras, de parâmetros sobre médias

População	Tamanho de amostra	Médias	Médias de amostras	Variâncias na amostragem	Variâncias de população	Graus de liberdade
1	n_1	μ_1	$\bar{x}_1$	s_1^2	σ_1^2	$n_1 - 1$
2	n_2	μ_2	$\bar{x}_2$	s_2^2	σ_2^2	$n_2 - 1$

O teste estatístico a ser usado para testar hipóteses sobre médias de populações é função de um grande número de fatores. Um deles é o método usado para obter as amostras. Duas *amostras são independentes* se os dados observados em uma não possuem relações com os dados observados na outra. E, *duas amostras são dependentes*, se os dados de uma amostra são alinhados naturalmente com os dados da outra.

Para comparar as médias μ_1 e μ_2 das populações 1 e 2, cujos dados são representados por x_1 e x_2 , usa-se a diferença das médias $d = x_1 - x_2$ e $\mu_d = \mu_1 - \mu_2$.

O teste é

$$\begin{aligned} H_o: \mu_d &= 0 \\ H_1: \mu_d &> 0 \end{aligned}$$

Para amostras pequenas, usa-se o teste *t* de Student. Se $\bar{d}$ é a média das diferenças entre as médias na amostragem; s_d , o desvio padrão das diferenças entre médias nas amostras e n o número diferenças entre médias e número de graus de liberdade $n - 1$, usa-se o teste estatístico:

$$t = \frac{\bar{d} - \mu_d}{s_d / \sqrt{n}}$$

O intervalo de confiança $1 - \alpha$ pode ser estimado

$$\bar{d} \pm t\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot \frac{s_d}{\sqrt{n}}$$

Segundo CHASE & BOWN (1992), páginas 313 a 320:

Sendo $n_1 > 30$ e $n_2 > 30$, usa-se, para teste da diferença entre médias de populações, o teste z , que tem distribuição aproximadamente normal.

$$z = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) - (\mu_1 - \mu_2)}{\sqrt{(\sigma_1^2 / n_1) + (\sigma_2^2 / n_2)}}$$

E, se as variâncias das populações, σ_1 , ou σ_2 , são desconhecidas, pode-se usar as variâncias estimadas para as amostras, s_1 ou s_2 , como estimativas para a população.

Os intervalos de confiança da diferença de médias podem ser estimados

$$(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) \pm z\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot \sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}$$

II.2.8 Inferências sobre diferenças entre médias de populações. Pequenas amostras.

Quando uma das amostras é pequena, número de observações menor que 30, as distribuições observadas sobre a população são aproximadamente normais, e σ_1 e σ_2 são conhecidos, pode-se adotar o t de Student para estudos sobre parâmetros das diferenças entre médias, $\mu_1 - \mu_2$:

a) Se $\sigma_1 = \sigma_2$,

$$t = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) - (\mu_1 - \mu_2)}{s_p \cdot \sqrt{(1/n_1) + (1/n_2)}}$$

Onde:

$$s_p = \sqrt{\frac{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}}$$

O teste estatístico proposto, t , tem a distribuição aproximada ao t de Student, com $n_1 + n_2 - 2$ graus de liberdade.

b) Se $\sigma_1 \neq \sigma_2$,

$$t = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) - (\mu_1 - \mu_2)}{\sqrt{(s_1^2 / n_1) + (s_2^2 / n_2)}}$$

O teste estatístico proposto, t , tem a distribuição aproximada ao t de Student, com o menor, $n_1 - 1$, ou, $n_2 - 1$, graus de liberdade.

É usual que as diferenças $\mu_1 - \mu_2$ sejam especificadas na hipótese nula.

E, para os intervalos de confiança $1 - \alpha$ da diferença entre médias, $\mu_1 - \mu_2$,

a) Se $\sigma_1 = \sigma_2$,

$$(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) \pm t\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot s_p \cdot \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}$$

Com $n_1 + n_2 - 2$ graus de liberdade;

b) Se $\sigma_1 \neq \sigma_2$,

$$(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) \pm t\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot \sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}$$

Com o menor, $n_1 - 1$, ou $n_2 - 1$, graus de liberdade.

III. Coleta e análise preliminar de dados

Os dados adotados para o experimento efetuado neste trabalho foram coletados em onze segmentos de pavimento da via Washington Luiz, do quilômetro 217 a 227, durante 1995. Uma *amostragem de conveniência* porque acompanha-se o comportamento desses segmentos da via desde sua implantação.

Cada segmento de estudos tem a extensão de 320m, conforme preconiza o procedimento DNER PRO 159/85, página 05/34, item 5.4 [DNER (1985)]. A Tabela 5 resume conjunto de dados sobre localização dos trechos estudados.

Tabela 5 - Descrição dos segmentos estudados

Sentido	Quilômetro Inicial	Quilômetro Final	Estaca Inicial	Estaca Final	Pontos levantados
São Carlos - São Paulo	217,760	217,440	50	34	2564
	220,440	220,121	122	106	2564
	221,00	220,68	150	134	2564
	222,200	221,88	270	254	2564
	224,000	223,680	345	329	2564
	227,000	226,680	490	474	2564
São Paulo - São Carlos	217,000	217,320	25	41	2564
	220,680	221,000	134	150	2564
	221,200	221,520	192	208	2564
	221,700	222,020	245	261	2564
	223,680	224,000	329	345	2564
O total de pontos levantados para estudo e análise de irregularidade					28.204

III.1 Resumo de história de pavimento da via Washington Luiz

A seguir resume-se uma série de informações sobre a via observada, a coleta e o processamento de dados sobre o tráfego e o pavimento da Washington Luiz.

A via Washington Luiz, foi construída em 1959, com uma só pista e duas faixas de tráfego, para ligar a Via Anhanguera a São José do Rio Preto. As faixas de tráfego possuíam largura de 3,5 metros, e o acostamento, 2,7 metros.

O pavimento era constituído de melhoria do subleito, uma camada de 20cm de macadame hidráulico, revestidos por uma capa de 5cm de concreto betuminoso usinado a quente.

A Tabela 6 resume fatos e a cronologia intervenções sobre o revestimento de pavimento na via Washington Luiz:

Tabela 6 - Fatos e cronologia de pavimento na rodovia Washington Luiz

Ano	Fato
1961	Primeiro recapeamento do revestimento, com correções em segmentos defeituosos
1969	Segundo recapeamento
1979	Terceiro recapeamento e construção uma segunda pista com duas faixas de rolamento. As camadas da segunda pista foram a melhoria do subleito, base de 20cm de espessura e revestimento de concreto betuminoso usinado a quente.
1989	Recapeamento das duas pistas, com reconstrução dos acostamentos com 2,7 m de largura, igualando os níveis da pista de rolamento e do acostamento.
a	Esse recapeamento foi uma camada de regularização ("Binder") com espessura variando entre 2 e 3cm e uma capa de concreto asfáltico com espessura de 1,5 a 3cm.
1990	Apenas no trecho entre as estacas 497 + 10,00 m e 373 + 10,00 m (sentido São Carlos São Paulo), foi feita uma camada de binder (5cm de espessura), e uma camada de capa (5cm de espessura).
	Onde o pavimento estava deteriorado ele foi demolido por fresagem do revestimento.

III.2 Classificação e contagem de tráfego na Washington Luiz

O estudo e classificação de volume de tráfego são indispensáveis para qualquer análise, avaliação ou projeto de componentes de pavimento. Segundo o DNER (1972), página 1/6, "o procedimento habitual para a obtenção de informações sobre o volume de trânsito é efetuar contagem nas rodovias, enumerando os veículos que passam por um ou vários pontos da via, classificando-os de acordo com a hora, direção ou sentido de movimento, seu tipo, etc."

Denomina-se *posto de contagem* a uma seção situada na via, onde são feitos os registros de contagem dos veículos que trafegam durante um período determinado para estudos.

A localização de posto de contagem deve ser escolhida de forma que as contagens sejam representativas do trecho a ser avaliado. Em função dos intervalos de tempo de contagem os postos convencionais são classificados pelo DNER (1972): permanentes, sazonais e de cobertura.

A escolha do local para instalação do posto de contagem deve considerar:

- a) A inserção do posto no trecho em estudo;
- b) A hipótese de que o posto deve ser afastado dos extremos do trecho sob estudos;
- c) A representatividade do local em relação ao trecho;
- d) Homogeneidade de composição do tráfego;
- e) Não existirem seções que alterem o trânsito no trecho.

A contagem volumétrica de veículos que trafegam por uma seção pode registrar o número de veículos que trafegam pela via agrupando-os por classes; registrar o número de veículos por direção de fluxo ou ainda, ou uma contagem mais ampla, onde são considerados os tipos de veículos ou classes, a direção e até mesmo o número de veículos por faixa de tráfego.

Diversos mecanismos podem ser usados para auxiliar a contagem, como: veículos com contadores, dispositivos automáticos que detectam a passagem do veículo por pressão; meios magnéticos, sonoros, radar, células foto-elétricas, fotos aéreas ou coleta de imagens com uso de câmaras de vídeo.

Dentre os processos ou mecanismos de contagem enumerados, a coleta de imagens em vídeo pode permitir um controle amplo e simultâneo de todas as variáveis do fluxo de tráfego, com a vantagem da facilidade de manuseio das imagens e possibilidade infinita de repetição da contagem, classificação e verificação dos resultados. A coleta de dados para estimativa de volumes e obtenção da distribuição de tipos de veículos que trafegam pela via Washington Luiz durante as pesquisas deste trabalho foi efetuada com uso de processamento de imagens coletadas através de câmaras de vídeo.

Em resumo:

- a) As imagens processadas foram coletadas em 3 dias de junho, julho e agosto de 1995, em períodos de 24 horas contínuas, no Posto de Polícia Militar Rodoviária de São Carlos, quilômetro 234 da via Washington Luiz;
- b) O processamento dos dados foi efetuado em escritório;
- c) Além disso, usou-se dados obtidos em arquivos sobre contagens de tráfego do DER-SP.

Para contagem e classificação, em ensaio preliminar adotou-se o exposto à página 07/34 do procedimento DNER PRO 159/85 [DNER (1985)]. Mas, a análise preliminar de resultados mostrou que os tipos de viaturas adotados não correspondiam à realidade da distribuição de veículos que usavam a via Washington Luiz. Assim, optou-se por reiniciar e usar as classes de viaturas ilustradas na Figura 16.

Figura 16 - Classes de veículos que trafegam pela via Washington Luiz

A Tabela 7 resume as distribuições de tipos de veículos obtida.

Tabela 7 - Distribuição de tráfego na via Washington Luiz

Sentido	Faixa	Cami- nhão 1	Cami- nhão 2	Semi- reboque 2	Semi- reboque 1	Semi- reboque 3	Combina- ção de reboques	Rodo- trem	Totais
São	Externa	665	1578	88	1018	129	0	3	3481
Paulo	Interna	106	138	22	126	18	0	1	411
	Total parcial	771	1716	110	1144	147	0	4	3892
Interior	Externa	691	1439	110	911	87	1	2	3241
	Interna	77	157	10	125	15	0	0	384
	Total parcial	768	1596	120	1036	102	1	2	3625
	Total Geral	1539	3312	230	2180	249	1	6	7517

Os gráficos contidos nas figuras 17 a 22 resumem a distribuição de tráfego por faixa total, sentidos São Paulo e Interior, para os tipos de veículos expostos na Figura 16.

A análise dos dados expostos nas figuras 17 a 22 indica primeiro visualmente que há uma diferença sensível entre o número de veículos comerciais que trafegam pela faixa interna e pela faixa externa. A Tabela 8 resume alguns dados estatísticos sobre os volume e classificação de tráfego na via Washington Luiz.

Figura 17 - Distribuição de tipos de veículos na via Washington Luiz em veículos por dia, contagens de um dia em junho, julho e agosto de 1995

Figura 18 - Distribuição de tipos de veículos por faixa de tráfego na via Washington Luiz, sentido São Paulo, em veículos por dia, contagens de um dia em junho, julho e agosto de 1995

Figura 19 - Distribuição de tipos de veículos por faixa de tráfego na via Washington Luiz, sentido Interior, em veículos por dia, contagens de um dia em junho, julho e agosto de 1995

Figura 20 - Distribuição de tipos de veículos na via Washington Luiz, em veículos por dia, contagens de um dia em junho, julho e agosto de 1995

Figura 21 - Distribuição de tipos de veículos comerciais por faixa de tráfego na via Washington Luiz, sentido São Paulo, em veículos por dia, contagens de um dia em junho, julho e agosto de 1995

Figura 22 - Distribuição de tipos de veículos comerciais por faixa de tráfego na via Washington Luiz, sentido Interior, em veículos por dia, contagens de um dia em junho, julho e agosto de 1995

Tabela 8 - Resumo de estatística descritiva de dados de tráfego na via Washington Luiz

	Faixa externa	Faixa interna
Média de veículos comerciais por dia	672	397
Desvio padrão	565,72	58,16

As informações resumidas na Tabela 8 indicam que na faixa externa há um tráfego de veículos comerciais de volume muito maior que na faixa interna. Sem entrar em detalhes, somos levados a concluir que a solicitação ao pavimento da faixa externa é maior que na faixa interna porque o número de solicitações por passagens de veículos comerciais será maior - *ou seja , a solicitação do pavimento é maior na faixa externa e provavelmente o desempenho da superfície do pavimento será maior na faixa externa.*

III.3 As cotas da superfície de pavimento

O procedimento adotado para obtenção das cotas da superfície do pavimento foi o proposto pelo DNER, DNER 173/86 [DNER (1986)].

O nivelamento topográfico foi realizado em setembro de 1995. O nível usado foi um nível ótico de tripé, modelo NI007, marca ZEISS, provido de placa plano-paralela, e mira INVAR (liga de aço e níquel com baixíssimo coeficiente de dilatação) com bolha de nível esférica para controle da verticalidade. Esse equipamento permite estimar intervalos de mira de 0,00001m ou 0,01mm.

A equipe de trabalho tinha seis pessoas: engenheiro, topógrafo, e quatro auxiliares. A máxima produção diária foi de 640 m (2564 pontos por dia). A segurança e a operação de tráfego foram controlados pela Polícia Militar Rodoviária do Estado de São Paulo.

Os segmentos onde foram obtidas as cotas relativas com o nível e a mira estão descritos na Tabela 5. Em cada um desses trechos, foram medidas as cotas relativas à referência de nível individual de cada segmento observado, e nas trilhas de roda externa e interna de cada faixa de tráfego, nos dois sentidos. E:

- Foram demarcados de 5 em 5 metros, com tinta sobre o pavimento;
- Possuíam uma referência de nível: a primeira estaca;
- Para controle dos intervalos de medidas - 0,50m - foi usada uma trena de aço, estendida e tracionada, sobre o pavimento.

Para evitar erros nos resultados de nivelamento:

- A verticalidade da mira foi controlada com uso de bolha esférica e as leituras foram efetuadas em cada posição da mira após o auxiliar que a segurava informar que a bolha estava centrada;

- e) Os erros atribuídos à curvatura da Terra e efeitos de refração atmosférica foram reduzidos adotando-se distâncias iguais entre as visadas à vante para mudanças do aparelho e visadas à ré;
- f) Foi adotada como limite a distância máxima de 30 metros para visadas sobre a mira, o que permitiu imagens nítidas e contribuiu para reduzir os erros acidentais de leitura.

As trilhas de roda:

- a) Estavam 0,75m de distância da borda do alinhamento externo e 2,15 do alinhamento interno;
- b) Mas, onde as trilhas estavam definidas pelo tráfego, ali foram tomadas as medidas, como preconizado na especificação DNER ES 173/86.

Após cada etapa de nivelamento efetuaram-se *operações de contra-nivelamento* para controle da precisão dos dados obtidos:

- a) Iniciadas mudando-se o aparelho de estação, para não usar dados de leitura sobre a mira provenientes das operações do próprio nivelamento no contra-nivelamento, evitando-se o acúmulo de eventual erro de leitura cometido no nivelamento;
- b) Partindo-se do ponto final do segmento e lendo na mira sobre as "estacas" de 5 em 5 metros, até o ponto inicial, referência de nível.

O controle de tolerância de erro:

- a) Adotou-se o limite de 0,002 m para a discrepância entre as cotas da referência de nível, determinadas a partir das operações de nivelamento e contra-nivelamento;
- b) Quando esse limite para a tolerância foi ultrapassado, o nivelamento do segmento foi refeito;
- c) A média aritmética da diferença entre os desníveis obtidos nas operações de ida e volta, dentro dos limites aceitáveis, foi adotada como desnível entre as referências de nível inicial e final;
- d) A metade da discrepância entre os dois valores medidos representa o erro médio quadrático da média, que multiplicado por 2/3 resulta no erro provável da média [GEMAEL (1988)];
- e) As seções entre duas referências de nível determinadas pelos pontos intermediários demarcados a cada 5 metros, quando necessário, tiveram as cotas ajustadas para concordar com a cota da referência de nível final corrigido;
- f) A correção de cotas em pontos intermediários foi feita, distribuindo-se a diferença entre o desnível medido e o corrigido entre as duas referências de nível, igualmente a todas as visadas ré, resultando em alteração nas alturas do instrumento em cada estação e das cotas dos pontos intermediários.

O Anexo I contém um grupo de gráficos que resumem os dados obtidos.

A Figura 23 ilustra um segmento no quilômetro 222, sentido São Paulo, e a Figura 24 um segmento no quilômetro 220, sentido Interior. Há que se comentar que o comportamento do pavimento no quilômetro 222, sentido São Paulo, é bem pior que no segmento 220, sentido Interior.

Figura 23 - Cotas nas trilhas de roda da via Washington Luiz, km 222, sentido São Paulo

Figura 24 - Cotas nas trilhas de roda da via Washington Luiz, km 220, sentido Interior

IV. Estudos sobre a aceleração vertical

IV.1 Estimativas da aceleração vertical média quadrática

As medidas das cotas de superfície do pavimento, faixas e trilhas foram processadas conforme o conjunto de métodos fixados pelo DNER [DNER ES 173/86, DNER(1986)]. Adotaram-se duas hipóteses de trabalho: a base de observação de 1,00m e a base de 2,50m.

As Figura 25 até a Figura 28 ilustram as distribuições de aceleração vertical, com os dois tipos de distâncias base para estimativas nos trechos dos quilômetros 220, sentido Interior e 222, sentido São Paulo.

O anexo III contém o conjunto de gráficos que sintetiza os resultados de estimativa de acelerações verticais para todos os trechos.

**Figura 25 - Estimativas de aceleração vertical (base de 1,00m)
Via Washington Luiz, km 220, sentido Interior**

**Figura 26- Estimativas de aceleração vertical (base de 2,50m).
Via Washington Luiz, km 220, sentido Interior.**

**Figura 27- Estimativas de aceleração vertical (base de 1,00m)
Via Washington Luiz, km 222, sentido São Paulo**

**Figura 28 - Estimativas de aceleração vertical (base de 2,50m).
Via Washington Luiz, km 222, sentido São Paulo.**

As Tabela 9 até a Tabela 12 resumem a estatística descritiva das acelerações verticais médias estimativas para os onze trechos estudados.

**Tabela 9 - Estatística descritiva da aceleração vertical média
(base de 1.00m), faixa de tráfego externa**

	<i>km 217, sentido São Paulo</i>	<i>km 217, sentido Interior</i>	<i>km 219, sentido São Paulo.</i>	<i>km 220, sentido São Paulo.</i>	<i>km 220, sentido Interior</i>	<i>km 221, sentido Interior</i>	<i>km 222, sentido São Paulo.</i>	<i>km 222, sentido Interior</i>	<i>km 224, sentido São Paulo.</i>	<i>km 224, sentido Interior</i>	<i>km 227, sentido São Paulo.</i>
Média	0.0588697	0.018053	0.076601	0.014913	0.010989	-0.017268	0.123945	0.0007849	0.06703	0.022056	0.018233
Erro padrão	0.174999	0.217495	0.2463605	0.140171	0.149769	0.164731	0.377295	0.107096	0.16986	0.176335	0.194963
Desvio padrão	4.416778	5.48934	5.466150	3.537780	3.723712	4.134514	9.425342	2.70300	4.28709	4.4505	4.920647
Variância da amostra	19.50792	30.13292	38.6617	12.51589	14.28840	17.28586	90.67805	7.306210	18.3792	19.807	24.21277
Intervalo	37	39	124.5	27	33.5	28	58.5	29.5	39.5	39.9	54.5
Mínimo	-18.5	-20.5	-50	-12	-18	-12	-29.5	-19.5	-15.5	-15	-23.5
Máximo	18.5	18.5	74.5	15	15.5	16	29	10	24	24.9	31
Soma	37.5	11.5	34.5	9.5	7	-11	50	0.5	42.7	14.05	-16.5
Nível de confiança (95%)	0.343645	0.427096	0.4837779	0.27525	0.294101	0.323482	0.74089	0.210305	0.333556	0.398572	0.382848

**Tabela 10 - Estatística descritiva da aceleração vertical média
(base de 1.00m), faixa de tráfego interna**

	<i>km 217, sentido São Paulo</i>	<i>km 217, sentido Interior.</i>	<i>km 219, sentido São Paulo.</i>	<i>km 220, sentido São Paulo.</i>	<i>km 220, sentido Interior</i>	<i>km 221, sentido Interior</i>	<i>km 222, sentido São Paulo.</i>	<i>km 222, sentido Interior</i>	<i>km 224, sentido São Paulo.</i>	<i>km 224, sentido Interior</i>	<i>km 227, sentido São Paulo</i>
Média	0.044740	0.002354	0.033595	0.016483	-0.002350	-0.024801	0.082417	-0.0839874	0.043956	0.022570	-0.025961
Erro padrão	0.1362190	0.1151327	0.22163	0.1061862	0.1497690	0.109721	0.2152908	0.1106729	0.1280747	0.0980740	0.1851733
Desvio padrão	3.438012	2.905818	3.327312	2.680025	2.769302	2.724365	5.433694	2.793258	2.475387	3.2324589	4.0734652
Variância da amostra	11.81992	8.443783	31.29124	7.18251	14.28840	7.421871	29.52503	7.802290	10.448794	6.126995	21.84219
Intervalo	27	21	40	24	33.5	21.5	36.5	31.5	28	17	79.5
Mínimo	-12.5	-11	-20.5	-9.5	-18	-11	-16.5	-22.5	-13	-8.5	-37
Máximo	14.5	10	19.5	14.5	15.5	10.5	20	9	15	8.5	42.5
Soma	28.5	1.5	25.5	10.5	7	-11	52.5	-53.5	19	28	8.5
Contagem	637	637	637	637	637	637	637	637	637	637	637
Nível de confiança (95%)	0.2674931	0.2260860	0.435227	0.2085179	0.2940137	0.2119639	0.4227663	0.2173283	0.2515001	0.1925879	0.3636247

**Tabela 11 - Estatística descritiva da aceleração vertical média
(base de 2.5m), faixa de tráfego externa**

	217, São Paulo	217, Interior	219, São Paulo	220, São Paulo	220, Interior	221, Interior	222, São Paulo	222, Interior.	224, São Paulo	224, Interior	227, São Paulo
Média	0.0428	0.0184	0.4675	0.0101	-0.0175	-0.0093	0.1466	0.0061	0.0168	-0.0071	0.0936
Erro padrão	0.0410	0.0573	0.0353	0.0333	0.0310	0.0461	0.0576	0.0277	0.0531	0.0254	0.0408
Desvio padrão	1.0309	1.4390	1.2969	0.9548	0.9701	1.1592	1.4476	0.6965	0.6501	0.6374	1.1097
Variância	1.0628	2.0707	0.7872	0.7000	0.6048	1.3438	2.0956	0.4851	1.7778	0.4062	1.0495
Intervalo	7.36	9.2	7.04	5.6	4.4	7.68	10.56	6.08	9.28	4.32	9.28
Mínimo	-3.2	-4.72	-3.28	-2.48	-1.92	-4	-4.88	-3.92	-5.04	-1.68	-4.48
Máximo	4.16	4.48	3.76	3.12	2.48	3.68	5.68	2.16	4.24	2.64	4.8
Nível de confiança (95%)	0.0806	0.1125	0.0694	0.0654	0.0608	0.0906	0.1132	0.0544	0.1042	0.0498	0.0801

**Tabela 12 - Estatística descritiva da aceleração vertical média
(base de 2.5m), faixa de tráfego interna**

	217, São Paulo	217, Interior	219, São Paulo	220, São Paulo	220, Interior	221, Interior	222, São Paulo	222, Interior.	224, São Paulo	224, Interior	227, São Paulo
Média	0.0245	0.0037	0.0531	0.0227	-0.0037	-0.0037	0.1104	-0.0187	0.0262	0.0531	-0.0936
Erro padrão	0.0336	0.0351	0.0516	0.0380	0.0386	0.0300	0.0533	0.0320	0.0326	0.0259	0.0442
Desvio padrão	0.8433	0.8807	0.8872	0.8366	0.7777	0.7547	1.3376	0.8040	0.8177	0.6374	1.0244
Variância	0.7111	0.7757	1.6822	0.9117	0.9412	0.5696	1.7893	0.6464	0.6687	0.4227	1.2315
Intervalo	6	5.68	12	5.52	6.64	4.64	10.56	5.2	5.46	4.095	9.52
Mínimo	-2.88	-3.04	-6.4	-2.8	-3.12	-2.48	-4.96	-3.04	-2.88	-1.84	-4.72
Máximo	3.12	2.64	5.6	2.72	3.52	2.16	5.6	2.16	2.58	2.255	4.8
Nível de confiança (95%)	0.0659	0.0689	0.1014	0.0746	0.0758	0.0590	0.1046	0.0629	0.0639	0.0508	0.0868

IV.2 Visualização de relações entre acelerações e desempenho de faixas de tráfego

Para continuação dos raciocínios, assumiu-se a hipótese de que as faixas de rolamento poderiam ser qualificadas a partir da média de aceleração vertical correspondente às suas trilhas de roda interna e externa - isso porque os usuários recebem os impactos de esforços provenientes de trilhas interna e externa simultaneamente.

Numa primeira etapa analisar-se-á graficamente os resultados obtidos. Numa segunda far-se-á testes estatísticos sobre as distribuições de acelerações verticais obtidas.

A Figura 29 resume as médias das médias obtidas em cada trecho observado para as estimativas de acelerações para a base de 1,00m.

Pode-se visualizar na Figura 29 que as *médias de valores de acelerações verticais obtidas com a distância de base de 1,00m, associadas às trilhas de rolamento de faixas externas da via Washington Luiz são maiores que as correspondentes nas faixas de tráfego internas, indicando uma maior solicitação aos veículos, condutores e passageiros que trafeguem por aquele pavimento* - uma das maneiras de demonstrar que o desempenho da faixa de tráfego externa é maior que o da faixa interna.

Figura 29 - Médias de acelerações verticais estimadas (base 1m)

A Figura 30 resume os desvios padrões associados às médias obtidas em cada trecho observado para as estimativas de acelerações para a base de 1,00m.

Pode-se visualizar na Figura 30 que os *desvios padrões de valores de acelerações verticais obtidas com a distância de base de 1,00m, associadas às trilhas de rolamento de faixas externas da via Washington Luiz são maiores que as correspondentes nas faixas de tráfego internas, indicando uma maior variabilidade na solicitação aos veículos, condutores e passageiros que trafeguem por aquele pavimento* - uma das maneiras de mostrar que o desempenho da faixa de tráfego externa tem variabilidade maior que o da faixa interna.

Figura 30 - Desvios padrões de acelerações verticais médias estimadas (base de 1m)

A Figura 31 resume as médias das médias obtidas em cada trecho observado para as estimativas de acelerações para a base de 2,50m.

Pode-se visualizar na Figura 31 que as médias de valores de acelerações verticais obtidas com a distância de base de 2,50m, associadas às trilhas de rolamento de faixas externas da via Washington Luiz tem ordenação correspondente ao das faixas de tráfego internas variável, dificultando análise de relações entre solicitações aos veículos, condutores e passageiros que trafeguem por aquele pavimento.

Figura 31 - Médias de acelerações verticais estimadas (base 2,5m)

Figura 32 - Desvios padrões de acelerações verticais médias estimadas (base de 2,5m)

A Figura 32 resume os desvios padrões associados às médias obtidas em cada trecho observado para as estimativas de acelerações para a base de 2,50m.

Pode-se visualizar na Figura 32 que os desvios padrões de valores de acelerações verticais obtidas com a distância de base de 2,5m, associadas às trilhas de rolamento de faixas externas da via Washington Luiz são maiores que os de faixas de tráfego internas, indicando maior variabilidade na solicitação aos que trafeguem por aquele pavimento - uma das maneiras de mostrar que o desempenho da faixa de tráfego externa tem variabilidade maior que o da faixa interna.

IV.3 Testes de hipóteses sobre aceleração vertical

A solicitação ao pavimento é proporcional ao módulo das forças que o solicitam. Ora, *isso equivale a dizer que essas solicitações são proporcionais ao módulo das acelerações verticais que se aplica aos veículos e passageiros.* Por isso, nas análises que se seguem, serão adotados os módulos de acelerações e sua distribuição para os testes sobre parâmetros que descrevem as acelerações verticais.

As Tabela 13 e Tabela 14 são uma consolidação de médias e variâncias associadas aos módulos de acelerações verticais médias quadráticas dos trechos observados. Os dados expostos serão usados para testar hipóteses sobre o desempenho de superfície das faixas de tráfego interna e externa da via Washington Luiz.

Tabela 13 - Médias e variâncias da aceleração vertical média (base de 1m)

	Médias		Variância	
	Faixa externa	Faixa interna	Faixa externa	Faixa interna
217 São Paulo	3.1264	2.6350	9.7218	4.8678
217 Interior	4.2143	2.1860	12.3451	3.6576
219 São Paulo	4.2736	2.4509	11.5873	5.0609
220 São Paulo	2.7072	2.0495	5.1755	2.9759
220 Interior	2.7270	2.1452	6.4181	3.0602
221 Interior	3.1542	2.0408	7.1310	3.2507
222 São Paulo	7.3957	4.1342	34.0698	12.4132
222 Interior	1.9537	2.0950	3.4833	3.4135
224 São Paulo	2.9025	1.9356	9.9459	2.3764
224 Interior	3.2896	2.4333	8.9693	4.5195
227 São Paulo	2.9380	2.5848	15.5681	9.9018

Tabela 14 - Médias e variâncias da aceleração vertical (base de 2,5m)

	Médias		Variâncias	
	Faixa externa	Faixa interna	Faixa externa	Faixa interna
217 São Paulo	0.9134	0.8377	0.6823	0.5509
217 Interior	1.3666	0.7705	1.4952	0.4236
219 São Paulo	1.2795	0.8310	1.4521	0.6409
220 São Paulo	0.8834	0.7443	0.5312	0.4056
220 Interior	0.8966	0.7123	0.6133	0.3340
221 Interior	1.1319	0.7015	0.9608	0.3481
222 São Paulo	1.3072	1.1503	1.4282	1.0691
222 Interior	0.6387	0.7160	0.3092	0.3579
224 São Paulo	1.1979	0.7605	1.4024	0.4195
224 Interior	0.6332	0.5909	0.2666	0.2402
227 São Paulo	0.8566	0.8342	0.8967	0.8451

Para teste de hipóteses sobre as relações entre o desempenho de pavimento nas faixas de tráfego internas e externas da Washington Luiz, assume-se que:

- O desempenho de faixas de rolamento é proporcional à aceleração vertical média estimada, porque ela representa as solicitações ao pavimento dos trechos estudados;
- O uso de bases de cálculo 1 e 2,5 m representa o comprimento de ondas das solicitações ao pavimento.

A primeira questão colocada é: *seriam iguais as acelerações verticais médias nas faixas internas e externas?*. Os testes usuais para hipóteses sobre essa questão são verificar se a diferença das médias são iguais a zero, e se as variâncias nas acelerações das faixas interna e externa são iguais.

Para as médias, como as acelerações são medidas sobre “mesmo sujeito de observação - a superfície do pavimento” - a hipótese nula a ser testada é:

H_0 : *As médias de acelerações verticais nas faixas externas são iguais às médias de acelerações nas faixas internas, ou seja, a diferença das médias é zero*

E, a conjectura (*suspeita ou crença*), a hipótese alternativa, é:

H_1 : *As médias de acelerações verticais nas faixas externas são diferentes das médias de acelerações nas faixas internas, ou seja, a diferença das médias é diferente de zero*

Para o conjunto completo de dados, o número de observações é 637 no caso da base de 1m, e, 631, para 2,5m - o teste estatístico adotado é o teste z , para as médias, grandes amostras.

- O nível de significância α adotado é "0,05";
- Os valores observados de z foram obtidos a partir dos dados observados para as acelerações na faixa externa;
- A região crítica em função do nível de significância α é definida por $|z| \geq 1.9637$;
- Caso o valor do teste estatístico pertença à região crítica, rejeitar H_0 , em favor da hipótese alternativa as *acelerações verticais médias nas faixas externas são diferentes das acelerações nas faixas internas*. Diz-se que os resultados são estatisticamente significantes.
- Se o valor do teste não pertence à região crítica, falhou-se ao rejeitar H_0 - não há evidências suficientes para rejeitar a hipótese nula - deve-se decidir em linguagem de leigos, porque não é possível usar o vocabulário técnico, e estudar caso a caso.

Para comparar estimativas de variâncias das acelerações verticais lembrando que os trechos e as faixas são independentes entre si, pode-se usar o teste estatístico F :

- $F = \frac{s_1^2}{s_2^2}$, relação entre as variâncias estimadas para a faixa externa e para a faixa interna, com o número de graus de liberdade, $[(n_1 - 1), (n_2 - 1)]$, igual a (636, 636), para a base de 1m, e (630, 630), para 2,5m;
- O nível de significância adotado é $\alpha = 0,05$;
- O teste de hipótese da variância para uma única cauda é assim formulado:

H_0 : As variâncias de acelerações verticais nas faixas externas são iguais às de acelerações nas faixas internas

H_1 : As variâncias de acelerações verticais nas faixas externas são maiores que as variâncias nas acelerações nas faixas internas

- O valor observado de F é estimado a partir dos dados de amostragem, e o valor $F(0,05; 636; 636)$ é 1.1394, e, $F(0,05; 630; 630)$ é 1.1404.

Se $F \geq F(\alpha)$, rejeitamos H_0 , ou seja as variâncias de acelerações verticais nas faixas externas são maiores que as variâncias nas acelerações nas faixas internas.

A Tabela 15 contém um resumo de resultados dos testes de média e variância efetuados para a base de 1m.

Tabela 15 - Teste de hipóteses sobre aceleração vertical média (base de 1m)

	z estimado	z de 0.025	Observações	F estimado	F de 0.05	Observações
217 São Paulo	3.24682	1.9637		1.9972	1.1394	
217 Interior	12.7967			3.3752		
219 São Paulo	11.2750			2.2896		
220 São Paulo	5.8147			1.7391		
220 Interior	4.7695			2.0973		
221 Interior	8.7210			2.1937		
222 São Paulo	12.0735			2.7447		
222 Interior	-1.3578		Não rejeita H_o	1.0204		Não rejeita H_o
224 São Paulo	6.9518			4.1854		
224 Interior	5.8844			1.9846		
227 São Paulo	1.7664		Não rejeita H_o	1.5722		

Analisando-se os resultados de testes de hipóteses expostos na Tabela 15, há que se observar que:

- Exceto para os trechos 222 (Interior) e 227 (São Paulo), a estimativa do teste z *pertence à zona crítica do teste*, e, portanto rejeita-se a hipótese nula, em favor da hipótese alternativa, *as médias de acelerações verticais nas faixas externas são diferentes das médias de acelerações nas faixas internas;*
- Exceto para trecho 222 (Interior), a estimativa do teste F , *pertence à zona crítica do teste*, ou seja, *as variâncias de acelerações verticais nas faixas externas são maiores que as variâncias nas acelerações das faixas internas.*

Os resultados expostos quanto ao trecho 222 (Interior) são compatíveis com a observação visual dos trechos no campo: as superfícies das faixas interna e externa nesse trecho são visualmente similares e oferecem praticamente o mesmo conforto ao rolamento.

A Tabela 16 contém um resumo de resultados dos testes de média e variância efetuados para a base de 2,5m.

Tabela 16 - Análise estatística da aceleração vertical (base de 2,5m)

	z estimado	z de 0.025	Observações	F estimado	F de 0.05	Observações
217 São Paulo	1.7195	1.9637	Não rejeita H_0	1.2384	1.14004	
217 Interior	10.8618			3.5300		
219 São Paulo	7.8240			2.2658		
220 São Paulo	3.6268			1.3097		
220 Interior	4.7792			1.8363		
221 Interior	9.4955			2.7600		
222 São Paulo	2.5045			1.3358		
222 Interior	-2.3868			0.8640		Não rejeita H_0
224 São Paulo	8.1784			3.3430		
224 Interior	2.1007			1.1098		Não rejeita H_0
227 São Paulo	0.4290		Não rejeita H_0	1.0610		Não rejeita H_0

Analisando-se os resultados de teste de hipótese expostos na Tabela 16 há que se observar que:

- Exceto para os trechos 217(São Paulo) e 227(São Paulo), a estimativa do teste z pertence à zona crítica do teste, e, portanto rejeita-se a hipótese nula, em favor da hipótese alternativa, *as médias de acelerações verticais nas faixas externas são diferentes de médias das acelerações nas faixas internas.*
- Exceto nos trechos 222 (Interior), 224 (Interior) e 227 (São Paulo), a estimativa do teste F , pertence à zona crítica do teste, ou seja, *as variâncias de acelerações verticais nas faixas externas são maiores que as variâncias de acelerações nas faixas internas.*

Analogamente, a observação em campo indicam que as faixas externa e interna associadas aos trechos 222 (Interior), 224 (Interior) e 227 (São Paulo) oferecem conforto similar ao rolamento de veículos, mas nos outros a variabilidade de conforto ao rolamento (descontinuidade) na superfície é uma realidade.

IV.4 O quociente de irregularidade

Os dados obtidos podem ser usados para estimativa do quociente de irregularidade, QI , de acordo com a especificação DNER ES 173/86 [DNER, (1986)].

A Tabela 17 resume as estimativas e estatísticas referentes aos quocientes de irregularidade nos trechos estimados, e faixas de tráfego interna e externa separadas.

Tabela 17 - Análise estatística do quociente de irregularidade

Trecho		Aceleração vertical média quadrática (base de 1m)		Aceleração vertical média quadrática (base de 2.5m)		Quociente de irregularidade (QI)	
Quilômetro	Sentido	Faixa externa	Faixa interna	Faixa externa	Faixa interna	Faixa externa	Faixa interna
217	São Paulo	5.5993	5.2557	1.2253	1.1136	49.65	45.36
217	Interior	7.7773	3.9488	1.8245	1.0035	74.65	35.19
219	São Paulo	7.5818	4.5885	1.7504	1.1480	72.02	41.92
220	São Paulo	4.5729	3.5460	1.1395	0.9704	41.66	32.06
220	Interior	5.1762	3.7873	1.1852	0.9127	46.27	32.44
221	Interior	5.6839	3.6909	1.4901	0.9120	55.28	31.83
222	São Paulo	12.627	7.2636	1.7622	1.5390	103.38	65.97
222	Interior	3.6003	3.6390	0.8426	0.9283	29.93	31.82
224	São Paulo	6.1219	4.3924	1.6776	0.9946	61.61	37.75
224	Interior	5.8317	3.3835	0.8131	0.7641	43.13	27.08
227	São Paulo	6.0208	5.0814	1.2703	1.2351	53.12	46.64

Para efeitos de teste sobre a média dos quocientes de irregularidade devemos observar que o número de amostras que temos é igual ao número de trechos, 11(once). Assim, trata-se de uma pequena amostra - o teste a ser aplicado é o *diferenças das médias com a estatística t de Student*. A região crítica de controle corresponde a duas caudas.

As hipóteses a serem testadas são:

H_0 : As médias de quocientes de irregularidade nas faixas externas são iguais às médias de QI nas faixas internas

H_1 : As médias de quocientes de irregularidade nas faixas externas são diferentes das médias de QI nas faixas internas

O α a ser adotado é 0,05, e rejeita-se a hipótese nula quando $|t_{\text{estimado}}| > t(0,05; 20 \text{ graus de liberdade}) = 2,0860$.

Para análise da média, adotamos o conjunto das médias obtidas, 11 trechos, onze pares de médias. A Tabela 18 resume os resultados de análise de diferenças de médias dos quocientes de irregularidade, todo o conjunto de trechos amostrados.

Tabela 18 - Análise estatística de diferenças de médias de quocientes de irregularidade

	Faixa Externa	Faixa Interna	t de controle	t estimado
Média	57.34	38.92	2.0860	2.6670
Variância	405.558	118.743		Rejeita-se H_0

As informações contidas na Tabela 18 indicam que o conjunto de 11 médias é uma amostragem que rejeita a hipótese nula em favor da hipótese alternativa, e então *as médias de quocientes de irregularidade nas faixas externas são diferentes das médias de QI nas faixas internas.*

Para analisar as variâncias dos pares faixa interna e faixa externa em cada trecho, pode adotar o teste F .

H_0 : *As variâncias de quocientes de irregularidade nas faixas externas são iguais às variâncias de QI nas faixas internas*

H_1 : *As variâncias de quocientes de irregularidade nas faixas externas são maiores que as variâncias de QI nas faixas internas*

Assim:

- a) F estimado com os valores de QI resultou 4,3905, e;
- b) Com $\alpha = 0,05$, o F para controle é 2,0860.

As variâncias dos coeficientes de irregularidade das faixas externas são um conjunto que rejeita a hipótese nula, e: *os quocientes de irregularidade nas faixas externas são maiores que as variâncias de QI nas faixas internas.*

V. Conclusões e sugestões

Mostrou-se que: a classificação e a contagem de veículos, estudos sobre distribuições de irregularidade na superfície de pavimentos podem contribuir para explicar diferenças de desempenho de pavimentos em faixas de tráfego distintas de rodovias.

V.1 Generalidades

O teste para demonstração da tese proposta foi possível, porque conseqüências de volumes de solicitações diferentes às faixas de tráfego em vias podem ser visíveis através de análise de resultados de observações sobre o comportamento e o desempenho de pavimento - por exemplo, as faixas externas de vias com duas faixas de tráfego e sentido único de circulação, desgastam-se mais que as internas.

E, a análise de dados coletados em um caso real e importante para a economia de recursos aplicados na manutenção de rodovias, a Via Washington Luiz, nas proximidades de São Carlos SP, Brasil - onde foram estudados onze trechos de rodovia, nas proximidades do quilômetro 220 - forneceu informações e resultados de testes de hipóteses que contribuem para sugerir que o estudo de irregularidade de superfície pode fornecer contribuições à classificação de pavimento em faixas distintas de rodovias. Cada segmento de estudos teve a extensão de 320m, conforme preconiza o procedimento DNER PRO 159/85, página 05/34, item 5.4 [DNER (1985)].

As bases teóricas nasceram em conceitos para análise de comportamento de pavimentos sugeridos pela AASHO, a partir de análises sobre dados obtidos na operação e pesquisas sobre a pista experimental da AASHO [CAREY & IRICK (1960), página 42; AASHO (1962), páginas 292 e 293].

Assim:

- a) A “*estimativa de capacidade para servir*”, ou “*Present serviceability rating*”, é uma estimativa da média de índices de capacidade para servir de um trecho de rodovia obtido a partir de “valores de capacidade para servir” estimados por um conjunto de indivíduos - no original [CAREY & IRICK(1960), página 42], “escolhidos pelo Highway Research Board”, e posteriormente generalizado para uso em estudos e pesquisas sobre comportamento de pavimentos;
- b) O modelo “quarter-car”, uma massa móvel (o corpo de veículo), uma suspensão móvel com amortecedor e um conjunto fixo (suspensão, pneu e eixo) e uma constante elástica do pneu e as tentativas de associar resultados obtidos com uso de medidores de irregularidade de superfícies de pavimentos à aceitação da “aceleração vertical média quadrática” como uma das principais informações usadas em estudos sobre relações entre as sensações de conforto e segurança com o rolamento de veículos do ponto de vista de motoristas, a capacidade para servir;
- c) A Norma DNER ES 173/86 fixa como unidade para a irregularidade o *QI*, nomeado quociente de irregularidade, *expresso em contagens/km*, e estimado por fórmula ali proposta;
- d) O termo *distância de base* é usado para referência aos comprimentos de onda atribuídas à irregularidade [GILLESPIE (1980)], que nos estudos de análise de solicitações aos veículos e seus passageiros passaram a ser adotados como padrão para obtenção de estatísticas que tentavam explicar o conforto durante o rolamento de veículo após os estudos com o modelo “quarter-car”.

A análise dos dados sobre contagem e classificação indicou, primeiro visualmente em gráficos, que há uma diferença sensível entre o número de veículos comerciais que trafegam pela faixa interna e pela faixa externa.

As diferenças de médias e desvios padrões mostraram que os volume e classificação de tráfego na via Washington Luiz são diferentes nas faixas internas e externas da via - *ou seja, há uma grande diferença de solicitação por passagem de veículos sobre os dois tipos de faixa da via, a interna e externa.*

Dentre os métodos, conceitos e processos usados destacamos:

- a) O procedimento adotado para obtenção das cotas da superfície do pavimento foi o proposto pelo DNER, DNER 173/86 [DNER (1986)]. O nivelamento topográfico foi realizado em setembro de 1995;
- b) Os dados sobre cotas de superfície do pavimento, faixas e trilhas foram processados conforme o conjunto de métodos fixados pelo DNER [DNER 173/86, DNER(1986)] para obtenção das acelerações verticais. Adotaram-se duas hipóteses de trabalho: a distância de base para observação de 1,00m e de 2,50m;
- c) Os raciocínios efetuados para cumprir a tentativa de demonstração da tese exposta assumiu a *hipótese de que as faixas de rolamento poderiam ser qualificadas a partir da média de aceleração vertical correspondente às suas trilhas de roda interna e externa* - isso porque os usuários recebem os impactos de esforços provenientes de trilhas interna e externa simultaneamente.

Dentre os resultados de análise sobre os dados estimados destacam-se:

- a) A análise de gráficos sobre as médias de aceleração vertical em cada trecho observado com distância de base 1,00m permitiu visualizar que *as médias de valores de acelerações verticais obtidas com essa distância de base, associadas às trilhas de rolamento de faixas externas da via Washington Luiz são maiores que as de faixas de tráfego internas;*
- b) Analogamente, para os desvios padrões associados às médias obtidas em cada trecho observado para as estimativas de acelerações e base de 1,00m ou 2.50m: *os desvios padrões de valores de acelerações verticais obtidas e associadas às trilhas de rolamento de faixas externas da via Washington Luiz são maiores que as correspondentes nas faixas de tráfego internas;*
- c) Mas, para as estimativas de acelerações com distância de base de 2,50m: *as médias de valores de acelerações verticais obtidas com essa distância de base, associadas às trilhas de rolamento de faixas externas da via Washington Luiz tem ordenação correspondente ao das faixas de tráfego internas variável, dificultando análise de relações entre solicitações aos veículos, condutores e passageiros que trafeguem por aquele pavimento, na faixa externa.*

Essas foram maneiras de identificar informações que mostram que o desempenho da faixa de tráfego externa tem média e variabilidade maior que o da faixa interna. *Indicando uma maior intensidade e variabilidade na solicitação aos veículos, condutores e passageiros que trafeguem por aquele pavimento, na faixa externa.*

Também cumpre ressaltar que os dados sobre cotas da superfície e trilhas obtidos podem ser usados para estimativa do quociente de irregularidade, QI , especificação DNER ES 173/86 [DNER, (1986)].

V.2 O uso da estatística

A *estatística* é a ciência que estuda, coleta, simplifica e descreve dados, e, também, as inferências obtidas através de análise desses dados e suas características. A *inferência estatística* é o conjunto de técnicas que pode ser utilizado para julgamentos sobre a população, a partir de propriedades observadas em amostras obtidas entre a população: é o processo usual para fazer juízos sobre parâmetros de uma população a partir de propriedades estimadas sobre amostras.

Assim, na análise de dados sobre a aceleração vertical, após *estimativa de parâmetros estatísticos*, ou seja, a aproximação de parâmetros descritivos de população (média, desvios padrões, etc.), a *tomada de decisões, testes de hipóteses*, consistiu em escolher entre duas afirmativas opostas sobre parâmetros que descreviam os dados estimados para a aceleração vertical.

A solicitação ao pavimento é proporcional ao módulo das forças que o solicitam. Ora, *isso equivale a dizer que essas solicitações são proporcionais ao módulo das acelerações verticais que se aplica aos veículos e passageiros*. Por isso, durante as análises que se seguiram foram adotados os módulos de acelerações e sua distribuição para os testes sobre parâmetros que descrevem as acelerações verticais.

A primeira questão colocada foi: *seriam iguais as acelerações verticais médias nas faixas internas e externas?*. Os testes para hipóteses sobre essa questão foi verificar se a diferença de médias são iguais a zero, e se as variâncias nas acelerações das faixas interna e externa são iguais.

Para o conjunto completo de dados, o número de observações é 637 no caso da base de 1m, e, 631, para 2,5m - o *teste estatístico adotado é o teste z, para as médias, grandes amostras*. Para comparar estimativas de variâncias das acelerações verticais lembrando que os trechos e as faixas são independentes entre si, o teste estatístico usado foi o F , e os resultados indicaram que:

- a) *As médias de acelerações verticais nas faixas externas são diferentes das médias de acelerações nas faixas internas;*
- b) *As variâncias de acelerações verticais nas faixas externas são maiores que as variâncias nas acelerações das faixas internas.*

Para teste de hipóteses sobre a *média dos quocientes de irregularidade*, o número de amostras é igual ao número de trechos, 11(onze). Assim, trata-se de

uma pequena amostra - e o teste aplicado foi "*diferenças das médias com a estatística t de Student*". A região crítica de controle corresponde a duas caudas. As informações obtidas indicaram que o conjunto de 11 pares de médias foi uma amostragem que rejeita a hipótese nula em favor da hipótese alternativa, e então *as médias de quocientes de irregularidade nas faixas externas são diferentes das médias de QI nas faixas internas*.

Para analisar as variâncias dos pares faixa interna e faixa externa em cada trecho o teste adotado foi o F . O resultado foi: *as variâncias de quocientes de irregularidade nas faixas externas são maiores que as de QI nas faixas internas*.

Os resultados da aplicação de conclusões aqui emitidas fornecem informações que contribuem à pesquisa sobre o desempenho de pavimentos, por colocar em análise e discussão a aplicação do conceito de capacidade para servir de pavimento - uma maneira particular para classificar o atendimento ao cliente de rodovias, ou verificar o nível de qualidade do rolamento de veículos.

Os estudos aqui relatados são o início de processos:

- a) Para divulgar a contagem e classificação de tráfego através do uso de imagens em vídeo;
- b) Para introduzir um pouco da estatística básica de análise aplicada diretamente a dados sobre irregularidade;
- c) Contribuir para disseminação do estudo de desempenho de pavimentos no País.

Isso é pouco em relação às necessidades de pesquisa sobre pavimentos, mas deu-se um passo em direção a explicações e soluções nesse campo.

V.3 Sugestões

Dentre as sugestões possíveis a partir dos estudos aqui relatados destacam-se o uso de conclusões, métodos e processos expostos para:

- a) Suporte ao desenvolvimento de processos para classificação de trechos em rodovias, visando a programação de investimentos;
- b) Idem, para processos de diagnóstico sobre comportamento de pavimentos com uso de distribuições de ocorrência de tipos de defeitos em pavimentos;
- c) Uso de contagens e classificação através de imagens de vídeo, associadas a pesagens, para obter o número de repetições de eixos padrão para estudo de dimensionamento de pavimentos.

O desenvolvimento das tarefas sugeridas pode ser efetuado através do aprofundamento nas técnicas expostas, e estudo dos dados obtidos e levantamentos complementares.

VI. Bibliografia

- AASHO. "The AASHO Road Test. Report 5: pavement research". Special report 61E. Washington, D.C., 1962.
- CAREY, W.N. & IRICK, P.R. "The pavement serviceability performance concept". Bulletin 250, Highway Research Board, Washington, DC, 1960.
- CHASE & BOWN "General Statistics". John Wiley & Sons, Inc, New York, 1992.
- DNER. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. DNER-TER 01/78. "Defeitos nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos - Terminologia". Rio de Janeiro, 1978a.
- DNER. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. DNER-PRO 07/78. "Avaliação subjetiva da superfície de pavimentos". Rio de Janeiro, 1978b.
- DNER. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. DNER-PRO 08/78. "Avaliação objetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos". Rio de Janeiro, 1978c.
- DNER. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. DNER-ES 128/83. "Levantamento da condição de superfície de segmentos-testemunha de rodovias de pavimento flexível ou semi-rígido para gerência de pavimentos a nível de rede". Rio de Janeiro, 1983a.
- DNER. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. "Manual de projeto de engenharia rodoviária". Volume 1, Rio de Janeiro, 1972.
- DNER. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. "Guia de referência de pavimentos". Rio de Janeiro, 1983b.

- DNER. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. DNER-PRO 159/85. *"Projeto de restauração de pavimentos flexíveis semi-rígidos"*. Rio de Janeiro, 1985.
- DNER. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. DNER-ES 173/86. *"Método de nível e mira para calibração de sistemas medidores de irregularidade tipo resposta"*. Rio de Janeiro, 1986.
- GEMAEL, C. *"Introdução à geodesia geométrica"*. Publicação interna do curso de pós-graduação em ciências geodesicas da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1988.
- GILLESPIE, T.D. et al. *"Calibration of response-type road roughness measuring systems"*. NCHRP Report 228, 1980.
- HAAS, R; HUDSON, W. R.; ZANIEWSKI, J. *"Modern pavement management"*. Malabar, Florida, 1994.
- HUDSON, W.R. et al. *"Pavement performance model development, volume 4, Roughness Measurement & Calibration Guidelines"*. Report nº FHWA-RD-84-106, Federal Highway Administration, Washington, DC, 1984.
- HUTCHINSON, B.G. *"Analysis of road roughness records by power spectral density techniques"*. Department. of Highways of Ontario Research, Report 101, Janeiro 1966.
- MACKENZIE, D.H. & HUDSON W.R. *"Road profile evaluation for compatible pavement evaluation"*. Anais do 61º Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, DC, 1982.
- MACKENZIE, D.H. & SRINARAWAT, M. *"Root mean square vertical acceleration (RMSVA) as a basis for Mays meter calibration"* GEIPOT. Project technical memorandum BR-23, Center for Transportation Research, The University of Texas, Austin, Fevereiro 1978.
- QUEIROZ, C. A. V. *"Modelos de previsão do desempenho para a gerência de pavimentos no Brasil"*. GEIPOT. Brasília, 1984.
- SPIEGEL, M.R. *"Estatística"*, McGraw-Hill do Brasil, 1977.
- SRINARAWAT, M. *"A method to calibrate and correlate road roughness devices using road profiles"*. PhD Thesis, University of Texas, Austin, 1982.

Anexo I - Perfis longitudinais da superfície do pavimento em trechos da via Washington Luiz

O presente anexo contém perfis longitudinais de superfície de pavimento da via Washington Luiz, para ilustrar o conjunto de valores de cotas obtidas durante o levantamento de dados para demonstração da tese proposta no trabalho "Desempenho de pavimento em faixas de tráfego distintas de rodovias".

Os gráficos expostos nas figuras A - I - 1 até A - I - 88 são os perfis longitudinais traçados com cotas de superfície de pavimento da via Washington Luiz, obtidas com uso de com uso de nivelamento topográfico, em setembro de 1995.

I .Trecho : km 217 da via Washington Luiz, sentido São Paulo

Figura A - I - 1- Perfis longitudinais nas trilhas de roda
Via Washington Luiz - km 217 - sentido São Paulo - Parte 1

Figura A - I - 2 - Perfis longitudinais nas trilhas de roda
Via Washington Luiz - km 217 - sentido São Paulo - Parte 2

Figura A - I - 3 - Perfis longitudinais nas trilhas de roda
Via Washington Luiz - km 217 - sentido São Paulo - Parte 3

Figura A - I - 4 - Perfis longitudinais nas trilhas de roda
Via Washington Luiz - km 217 - sentido São Paulo - Parte 4

Figura A - I - 5 - Perfis longitudinais nas trilhas de roda
Via Washington Luiz - km 217 - sentido São Paulo - Parte 5

Figura A - I - 6 - Perfis longitudinais nas trilhas de roda
Via Washington Luiz - km 217 - sentido São Paulo - Parte 6

Figura A - I - 7 - Perfis longitudinais nas trilhas de roda
Via Washington Luiz - km 217 - sentido São Paulo - Parte 7

Figura A - I - 8 - Perfis longitudinais nas trilhas de roda
Via Washington Luiz - km 217 - sentido São Paulo - Parte 8

II. Trecho : km 217 da via Washington Luiz, sentido Interior

Figura A - I - 9 - Perfis longitudinais nas trilhas de roda
Via Washington Luiz - km 217 - sentido Interior - parte 1

Figura A - I - 10 - Perfis longitudinais nas trilhas de roda
Via Washington Luiz - km 217 - sentido Interior - parte 2

Figura A - I - 11 - Perfis longitudinais nas trilhas de roda
Via Washington Luiz - km 217 - sentido Interior - parte 3

Figura A - I - 12 - Perfis longitudinais nas trilhas de roda
Via Washington Luiz - km 217 - sentido Interior - parte 4

Figura A - I - 13 - Perfis longitudinais nas trilhas de roda
Via Washington Luiz - km 217 - sentido Interior - parte 5

Figura A - I - 14 - Perfis longitudinais nas trilhas de roda
Via Washington Luiz - km 217 - sentido Interior - parte 6

Figura A - I - 15 - Perfis longitudinais nas trilhas de roda
Via Washington Luiz - km 217 - sentido Interior - parte 7

Figura A - I - 16 - Perfis longitudinais nas trilhas de roda
Via Washington Luiz - km 217 - sentido Interior - parte 8

III. Trecho: km 219 da via Washington Luiz, sentido São Paulo

Figura A - I - 17 - Perfis longitudinais nas trilhas de roda
Via Washington Luiz - km 219 - sentido São Paulo - parte 1

Figura A - I - 18 - Perfis longitudinais nas trilhas de roda
Via Washington Luiz - km 219 - sentido São Paulo - parte 2

Figura A - I - 19 - Perfis longitudinais nas trilhas de roda
Via Washington Luiz - km 219 - sentido São Paulo - parte 3

Figura A - I - 20 - Perfis longitudinais nas trilhas de roda
Via Washington Luiz - km 219 - sentido São Paulo - parte 4

Figura A - I - 21 - Perfis longitudinais nas trilhas de roda
Via Washington Luiz - km 219 - sentido São Paulo - parte 5

Figura A - I - 22 - Perfis longitudinais nas trilhas de roda
Via Washington Luiz - km 219 - sentido São Paulo - parte 6

Figura A - I - 23 - Perfis longitudinais nas trilhas de roda
Via Washington Luiz - km 219 - sentido São Paulo - parte 7

Figura A - I - 24 - Perfis longitudinais nas trilhas de roda
Via Washington Luiz - km 219 - sentido São Paulo - parte 8

IV: Trecho: km 220 da via Washington Luiz, sentido São Paulo

Figura A - I - 25 - Perfis longitudinais nas trilhas de roda
Via Washington Luiz - km 220 - sentido São Paulo - parte 1

Figura A - I - 26 - Perfis longitudinais nas trilhas de roda
Via Washington Luiz - km 220 - sentido São Paulo - parte 2

Figura A - I - 27 - Perfis longitudinais nas trilhas de roda
Via Washington Luiz - km 220 - sentido São Paulo - parte 3

Figura A - I - 28 - Perfis longitudinais nas trilhas de roda
Via Washington Luiz - km 220 - sentido São Paulo - parte 4

Figura A - I - 29 - Perfis longitudinais nas trilhas de roda
Via Washington Luiz - km 220 - sentido São Paulo - parte 5

Figura A - I - 30 - Perfis longitudinais nas trilhas de roda
Via Washington Luiz - km 220 - sentido São Paulo - parte 6

Figura A - I - 31 - Perfis longitudinais nas trilhas de roda
Via Washington Luiz - km 220 - sentido São Paulo - parte 7

Figura A - I - 32 - Perfis longitudinais nas trilhas de roda
Via Washington Luiz - km 220 - sentido São Paulo - parte 8

V. Trecho : km 220 da via Washington Luiz, sentido interior

Figura A - I - 33 - Perfis longitudinais nas trilhas de roda
Via Washington Luiz - km 220 - sentido Interior - parte 1

Figura A - I - 34 - Perfis longitudinais nas trilhas de roda
Via Washington Luiz - km 220 - sentido Interior - parte 2

Figura A - I - 35 - Perfis longitudinais nas trilhas de roda
Via Washington Luiz - km 220 - sentido Interior - parte 3

Figura A - I - 36 - Perfis longitudinais nas trilhas de roda
Via Washington Luiz - km 220 - sentido Interior - parte 4

Figura A - I - 37 - Perfis longitudinais nas trilhas de roda
Via Washington Luiz - km 220 - sentido Interior - parte 5

Figura A - I - 38 - Perfis longitudinais nas trilhas de roda
Via Washington Luiz - km 220 - sentido Interior - parte 6

Figura A - I - 39 - Perfis longitudinais nas trilhas de roda
Via Washington Luiz - km 220 - sentido Interior - parte 7

Figura A - I - 40 - Perfis longitudinais nas trilhas de roda
Via Washington Luiz - km 220 - sentido Interior - parte 8

VI. Trecho : km 221 da via Washington Luiz, sentido interior

Figura A - I - 41 - Perfis longitudinais nas trilhas de roda
Via Washington Luiz - km 221 - sentido Interior - parte 1

Figura A - I - 42 - Perfis longitudinais nas trilhas de roda
Via Washington Luiz - km 221 - sentido Interior - parte 2

Figura A - I - 43 - Perfis longitudinais nas trilhas de roda
Via Washington Luiz - km 221 - sentido Interior - parte 3

Figura A - I - 44 - Perfis longitudinais nas trilhas de roda
Via Washington Luiz - km 221 - sentido Interior - parte 4

Figura A - I - 45 - Perfis longitudinais nas trilhas de roda
Via Washington Luiz - km 221 - sentido Interior - parte 5

Figura A - I - 46 - Perfis longitudinais nas trilhas de roda
Via Washington Luiz - km 221 - sentido Interior - parte 6

Figura A - I - 47 - Perfis longitudinais nas trilhas de roda
Via Washington Luiz - km 221 - sentido Interior - parte 7

Figura A - I - 48 - Perfis longitudinais nas trilhas de roda
Via Washington Luiz - km 221 - sentido Interior - parte 8

VII. Trecho :km 222 da via Washington Luiz, sentido São Paulo

Figura A - I - 49 - Perfis longitudinais nas trilhas de roda
Via Washington Luiz - km 222 - sentido São Paulo - parte 1

Figura A - I - 50 - Perfis longitudinais nas trilhas de roda
Via Washington Luiz - km 222 - sentido São Paulo - parte 2

Figura A - I - 51 - Perfis longitudinais nas trilhas de roda
Via Washington Luiz - km 222 - sentido São Paulo - parte 3

Figura A - I - 52 - Perfis longitudinais nas trilhas de roda
Via Washington Luiz - km 222 - sentido São Paulo - parte 4

Figura A - I - 53 - Perfis longitudinais nas trilhas de roda
Via Washington Luiz - km 222 - sentido São Paulo - parte 5

Figura A - I - 54 - Perfis longitudinais nas trilhas de roda
Via Washington Luiz - km 222 - sentido São Paulo - parte 6

Figura A - I - 55 - Perfis longitudinais nas trilhas de roda
Via Washington Luiz - km 222 - sentido São Paulo - parte 7

Figura A - I - 56 - Perfis longitudinais nas trilhas de roda
Via Washington Luiz - km 222 - sentido São Paulo - parte 8

VIII. Trecho : km 222 da via Washington Luiz, sentido interior

Figura A - I - 57 - Perfis longitudinais nas trilhas de roda
Via Washington Luiz - km 222 - sentido Interior - parte 1

Figura A - I - 58 - Perfis longitudinais nas trilhas de roda
Via Washington Luiz - km 222 - sentido Interior - parte 2

Figura A - I - 59 - Perfis longitudinais nas trilhas de roda
Via Washington Luiz - km 222 - sentido Interior - parte 3

Figura A - I - 60 - Perfis longitudinais nas trilhas de roda
Via Washington Luiz - km 222 - sentido Interior - parte 4

Figura A - I - 61 - Perfis longitudinais nas trilhas de roda
Via Washington Luiz - km 222 - sentido Interior - parte 5

Figura A - I - 62 - Perfis longitudinais nas trilhas de roda
Via Washington Luiz - km 222 - sentido Interior - parte 6

Figura A - I - 63 - Perfis longitudinais nas trilhas de roda
Via Washington Luiz - km 222 - sentido Interior - parte 7

Figura A - I - 64 - Perfis longitudinais nas trilhas de roda
Via Washington Luiz - km 222 - sentido Interior - parte 8

IX. Trecho : km 224 da via Washington Luiz, sentido São Paulo

Figura A - I - 65 - Perfis longitudinais nas trilhas de roda
Via Washington Luiz - km 224 - sentido São Paulo - parte 1

Figura A - I - 66 - Perfis longitudinais nas trilhas de roda
Via Washington Luiz - km 224 - sentido São Paulo - parte 2

Figura A - I - 67 - Perfis longitudinais nas trilhas de roda
Via Washington Luiz - km 224 - sentido São Paulo - parte 3

Figura A - I - 68 - Perfis longitudinais nas trilhas de roda
Via Washington Luiz - km 224 - sentido São Paulo - parte 4

Figura A - I - 69 - Perfis longitudinais nas trilhas de roda
Via Washington Luiz - km 224 - sentido São Paulo - parte 5

Figura A - I - 70 - Perfis longitudinais nas trilhas de roda
Via Washington Luiz - km 224 - sentido São Paulo - parte 6

Figura A - I - 71 - Perfis longitudinais nas trilhas de roda
Via Washington Luiz - km 224 - sentido São Paulo - parte 7

Figura A - I - 72 - Perfis longitudinais nas trilhas de roda
Via Washington Luiz - km 224 - sentido São Paulo - parte 8

X. Trecho : km 224 da via Washington Luiz, sentido interior

Figura A - I - 73 - Perfis longitudinais nas trilhas de roda
Via Washington Luiz - km 224 - sentido Interior - parte 1

Figura A - I - 74 - Perfis longitudinais nas trilhas de roda
Via Washington Luiz - km 224 - sentido Interior - parte 2

Figura A - I - 75 - Perfis longitudinais nas trilhas de roda
Via Washington Luiz - km 224 - sentido Interior - parte 3

Figura A - I - 76 - Perfis longitudinais nas trilhas de roda
Via Washington Luiz - km 224 - sentido Interior - parte 4

Figura A - I - 77 - Perfis longitudinais nas trilhas de roda
Via Washington Luiz - km 224 - sentido Interior - parte 5

Figura A - I - 78 - Perfis longitudinais nas trilhas de roda
Via Washington Luiz - km 224 - sentido Interior - parte 6

Figura A - I - 79 - Perfis longitudinais nas trilhas de roda
Via Washington Luiz - km 224 - sentido Interior - parte 7

Figura A - I - 80 - Perfis longitudinais nas trilhas de roda
Via Washington Luiz - km 224 - sentido Interior - parte 8

XI. Trecho : km 227 da via Washington Luiz, sentido São Paulo

Figura A - I - 81 - Perfis longitudinais nas trilhas de roda
Via Washington Luiz - km 227 - sentido São Paulo - parte 1

Figura A - I - 82 - Perfis longitudinais nas trilhas de roda
Via Washington Luiz - km 227 - sentido São Paulo - parte 2

Figura A - I - 83 - Perfis longitudinais nas trilhas de roda
Via Washington Luiz - km 227 - sentido São Paulo - parte 3

Figura A - I - 84 - Perfis longitudinais nas trilhas de roda
Via Washington Luiz - km 227 - sentido São Paulo - parte 4

Figura A - I - 85 - Perfis longitudinais nas trilhas de roda
Via Washington Luiz - km 227 - sentido São Paulo - parte 5

Figura A - I - 86 - Perfis longitudinais nas trilhas de roda
Via Washington Luiz - km 227 - sentido São Paulo - parte 6

Figura A - I - 87 - Perfis longitudinais nas trilhas de roda
Via Washington Luiz - km 227 - sentido São Paulo - parte 7

Figura A - I - 88 - Perfis longitudinais nas trilhas de roda
Via Washington Luiz - km 227 - sentido São Paulo - parte 8

Anexo II - Contagem e classificação de tráfego na via Washington Luiz

As tabelas A II - 1 a A II - 8 resumem resultados de contagem e classificação de tráfego na via Washington Luiz, quilômetro 234, Posto de Polícia Militar Rodoviária de São Carlos, obtidas com o processamento de imagens gravadas em vídeo em junho, julho e agosto de 1995, uma parcela dos dados usados durante a demonstração da tese proposta no trabalho "Desempenho de pavimento em faixas de tráfego distintas de rodovias.

Tabela A II - 1 - Faixa de tráfego externa - sentido São Paulo - Automóveis e ônibus

Intervalo de hora no dia	Automóveis	Ônibus	Intervalo de hora no dia	Automóveis	Ônibus
1	34	7	13	159	10
2	35	13	14	178	12
3	20	8	15	161	13
4	15	6	16	176	16
5	26	16	17	224	28
6	79	20	18	194	16
7	188	26	19	143	17
8	272	9	20	129	9
9	172	11	21	88	5
10	171	9	22	76	5
11	184	14	23	62	3
12	170	10	24	84	7

Tabela A II - 2 - Faixa de tráfego externa - sentido São Paulo - Caminhões

Intervalo de hora no dia	Caminhão		Semi-reboques			Rodotrens	Combinação de reboques
	2 eixos	3 eixos	4 eixos	5 eixos	6 eixos	9 eixos	11 eixos
1	15	56	2	25	2	0	0
2	5	54	2	21	0	0	0
3	4	28	0	20	0	0	0
4	9	40	3	18	2	0	0
5	10	40	3	31	2	0	0
6	31	69	3	50	2	0	0
7	19	68	1	41	1	0	0
8	37	42	4	19	6	0	0
9	47	65	7	32	13	0	0
10	38	67	4	44	0	0	0
11	47	81	10	66	2	0	0
12	27	65	3	42	7	1	0
13	36	71	4	50	7	2	0
14	51	83	3	53	8	0	0
15	35	43	9	43	4	0	0
16	58	80	4	57	0	0	0
17	33	91	5	70	4	0	0
18	55	84	3	51	7	0	0
19	22	71	1	52	5	0	0
20	40	76	6	47	21	0	0
21	12	81	2	42	11	0	0
22	13	76	3	48	8	0	0
23	13	65	2	47	10	0	0
24	8	82	4	49	7	0	0

Tabela A II - 3 - Faixa de tráfego interna - sentido São Paulo - Automóveis e ônibus

Intervalo de hora no dia	Automóveis	Ônibus	Intervalo de hora no dia	Automóveis	Ônibus
1	9	0	13	141	2
2	10	1	14	152	1
3	5	0	15	141	0
4	10	1	16	196	1
5	29	1	17	228	0
6	46	1	18	116	1
7	113	2	19	173	1
8	104	1	20	120	6
9	169	1	21	64	0
10	147	0	22	64	0
11	161	6	23	41	0
12	153	0	24	42	0

Tabela A II - 4 - Faixa de tráfego interna - sentido São Paulo - Caminhões

Intervalo de hora no dia	Caminhão		Semi-reboques			Rodotrens	Combinação de reboques
	2 eixos	3 eixos	4 eixos	5 eixos	6 eixos	9 eixos	11 eixos
1	2	4	0	2	0	0	
2	1	1	0	0	0	0	0
3	1	1	0	0	0	0	0
4	1	4	0	0	0	0	0
5	3	6	0	2	0	0	0
6	5	10	1	4	0	0	0
7	6	8	0	14	1	0	0
8	4	0	0	2	0	0	0
9	8	2	1	3	1	0	0
10	6	12	2	5	3	0	0
11	9	4	3	12	0	0	0
12	10	10	1	7	0	0	0
13	4	5	0	12	7	1	0
14	11	10	1	8	2	0	1
15	2	3	2	4	1	0	0
16	7	6	0	3	0	0	0
17	7	4	2	8	1	0	0
18	7	12	2	10	0	0	0
19	2	11	0	3	0	0	0
20	4	4	3	8	0	0	0
21	0	5	1	9	0	0	0
22	3	5	1	4	2	0	0
23	1	5	1	4	0	0	0
24	2	6	1	2	0	0	0

Tabela A II - 5 - Faixa de tráfego externa - sentido Interior - Automóveis e ônibus

Intervalo de hora no dia	Automóveis	Ônibus	Intervalo de hora no dia	Automóveis	Ônibus
1	43	13	13	175	8
2	28	13	14	203	13
3	21	14	15	202	12
4	20	5	16	176	13
5	29	8	17	222	14
6	60	36	18	119	10
7	193	20	19	165	17
8	285	5	20	167	12
9	200	5	21	157	14
10	192	10	22	97	12
11	169	6	23	95	12
12	180	8	24	113	12

Tabela A II - 6 - Faixa de tráfego externa - sentido Interior - Caminhões

Intervalo de hora no dia	Caminhão		Semi-reboques			Rodotrens	Combinação de reboques
	2 eixos	3 eixos	4 eixos	5 eixos	6 eixos	9 eixos	11 eixos
1	14	21	2	21	1	0	0
2	15	3	2	26	1	0	0
3	11	32	1	21	1	0	0
4	5	19	4	16	1	0	0
5	12	33	1	18	2	0	0
6	27	81	3	40	4	0	0
7	22	52	1	37	0	0	0
8	25	39	3	21	5	0	0
9	51	73	8	52	10	0	0
10	41	57	8	43	8	0	0
11	27	81	8	45	3	0	0
12	51	81	4	26	8	0	0
13	35	69	4	45	3	0	1
14	45	66	4	37	6	0	0
15	24	76	5	52	3	0	0
16	59	76	6	43	3	0	0
17	46	90	10	58	2	0	0
18	35	93	7	68	3	0	0
19	36	68	3	43	4	1	0
20	28	86	5	45	5	0	0
21	34	73	5	59	4	1	0
22	21	61	8	29	4	0	0
23	14	43	5	34	4	0	0
24	13	66	3	32	2	0	0

Tabela A II - 7 - Faixa de tráfego interna - sentido São Paulo - Automóveis e ônibus

Intervalo de hora no dia	Automóveis	Ônibus	Intervalo de hora no dia	Automóveis	Ônibus
1	10	0	13	107	3
2	11	0	14	176	1
3	10	1	15	177	0
4	8	0	16	179	0
5	24	1	17	170	1
6	73	3	18	218	0
7	131	2	19	182	1
8	119	1	20	122	7
9	227	0	21	96	2
10	143	2	22	72	0
11	130	0	23	71	0
12	145	2	24	63	1

Tabela A II - 8 - Faixa de tráfego interna - sentido São Paulo - Caminhões

Intervalo de hora no dia	Caminhão		Semi-reboques			Rodotrens	Combinação de reboques
	2 eixos	3 eixos	4 eixos	5 eixos	6 eixos	9 eixos	11 eixos
1	0	2	0	2	0	0	0
2	3	1	0	2	0	0	0
3	1	1	0	2	0	0	0
4	1	2	0	0	0	0	0
5	3	5	0	0	0	0	0
6	8	12	0	8	0	0	0
7	8	9	0	10	1	0	0
8	5	1	1	2	0	0	0
9	3	5	0	5	0	0	0
10	5	12	1	7	1	0	1
11	5	7	1	7	0	0	0
12	2	10	0	9	1	0	0
13	2	5	0	10	0	0	0
14	7	8	1	4	2	0	0
15	1	10	1	12	2	0	0
16	2	13	1	6	2	0	0
17	7	8	2	9	2	0	0
18	4	6	1	5	0	0	0
19	4	11	0	7	1	0	0
20	4	3	0	3	0	0	0
21	1	4	0	2	0	0	0
22	0	6	0	3	1	0	0
23	0	8	1	8	2	0	0
24	1	8	0	2	0	0	0

Anexo III - Acelerações verticais médias em 11 trechos experimentais na via Washington Luiz

O presente anexo contém acelerações verticais médias, estimadas com dados de perfis longitudinais de superfície de pavimento da via Washington Luiz, usados para demonstração da tese proposta no trabalho "Desempenho de pavimento em faixas de tráfego distintas de rodovias".

Os gráficos expostos nas figuras A - III - 1 até A - III - 11 resumem os resultados de estimativas de acelerações verticais médias durante uso de pavimento da via Washington Luiz, estimativas efetuadas a partir de dados sobre cotas de nivelamento topográfico, em setembro de 1995 - a base adotada foi 1,00m. Analogamente, nas figuras A - III - 12 a A - III - 22, para a base de 2,50m.

**Figura A III - 1 - Estimativas de aceleração vertical (base de 1,00m)
Via Washington Luiz, km 217, sentido São Paulo**

**Figura A III - 2 - Estimativas de aceleração vertical (base de 1,00m)
Via Washington Luiz, km 217, sentido Interior**

Figura A III - 3 - Estimativas de aceleração vertical (base de 1,00m)
Via Washington Luiz, km 219, sentido São Paulo

Figura A III - 4 - Estimativas de aceleração vertical (base 1,00m)
Via Washington Luiz, km 220, sentido São Paulo

Figura A III - 5 - Estimativas de aceleração vertical (base de 1,00m)
Via Washington Luiz, km 220, sentido Interior

Figura A III - 6 - Estimativas de aceleração vertical (base de 1,00m)
Via Washington Luiz, km 221, sentido interior

Figura A III - 7 - Estimativas de aceleração vertical (base de 1,00m)
Via Washington Luiz, km 222, sentido São Paulo

Figura A III - 8 - Estimativas de aceleração vertical (base de 1,00m)
Via Washington Luiz, km 222, sentido Interior

Figura A III - 9- Estimativas de aceleração vertical (base de 1,00m)
Via Washington Luiz, km 224, sentido São Paulo

Figura A III - 10 - Estimativas de aceleração vertical (base de 1,00m)
Via Washington Luiz, km 224, sentido Interior

**Figura A III - 11 - Estimativas de aceleração vertical (base de 1,00m)
Via Washington Luiz, km 227, sentido São Paulo**

**Figura A III - 12 - Estimativas de aceleração vertical
Via Washington Luiz, km 217, sentido São Paulo (base de 2,50m)**

**Figura A III - 13- Estimativas de aceleração vertical
Via Washington Luiz, km 217, sentido Interior (base de 2,50m)**

**Figura A III - 14 - Estimativas de aceleração vertical
Via Washington Luiz, km 219, sentido São Paulo (base de 2,50m)**

**Figura A III - 15 - Estimativas de aceleração vertical
Via Washington Luiz, km 220, sentido São Paulo (base de 2,50m)**

**Figura A III - 16 - Estimativas de aceleração vertical
Via Washington Luiz, km 220, sentido Interior (base de 2,50m)**

Figura A III - 17 - Estimativas de aceleração vertical
Via Washington Luiz, km 221, sentido Interior (base de 2,50m)

Figura A III - 18 - Estimativas de aceleração vertical
Via Washington Luiz, km 222, sentido São Paulo (base de 2,50m)

Figura A III - 19 - Estimativas de aceleração vertical
Via Washington Luiz, km 222, sentido Interior (base de 2,50m)

Figura A III - 20 - Estimativas de aceleração vertical
Via Washington Luiz, km 224, sentido São Paulo (base de 2,50m)

Figura A III - 21 - Estimativas de aceleração vertical
Via Washington Luiz, km 224, sentido Interior (base de 2,50m)

Figura A III - 22 - Estimativas de aceleração vertical
Via Washington Luiz, km 227, sentido São Paulo (base de 2,50m)