

ARTIGO

ESTIMATIVA DAS CARGAS DINÂMICAS DOS VEÍCULOS RODOVIÁRIOS QUE ATUAM SOBRE OS PAVIMENTOS E PONTES

José Leomar Fernandes Júnior

Departamento de Transportes
Escola de Engenharia de São Carlos
Universidade de São Paulo

Rone Evaldo Barbosa

Departamento de Engenharia Civil
Faculdade de Ciências Exatas e Tecnológicas
Universidade Estadual de Goiás

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo avaliar os efeitos de diversos fatores de tráfego e da irregularidade longitudinal sobre as cargas dinâmicas dos veículos rodoviários, que efetivamente atuam nos pavimentos e pontes. Para este propósito, foram realizadas simulações com o programa computacional *TruckSim*, que é baseado em modelos matemáticos de veículos e perfil longitudinal dos pavimentos. Com base em parâmetros de veículos de carga brasileiros, foram avaliados os seguintes fatores: tipo de veículo, cargas por eixo, velocidade, tipo de suspensão, tipo de eixo e condição dos pavimentos (irregularidade longitudinal).

ABSTRACT

This work aims to quantify the effects of traffic loading factors and pavement roughness on dynamic loads of road vehicles, which act effectively on pavements and bridges. It is used the computer program *TruckSim* to accomplish the simulations. The *TruckSim* is based on mathematical models of vehicles and the longitudinal

profile of pavements. Based on Brazilian vehicle parameters, it is evaluated the following factors: vehicle type, axle load, velocity, suspension type, axle type and pavement conditions (roughness).

1. INTRODUÇÃO

A interação entre os veículos e os pavimentos, bem como a interação entre os veículos e as pontes, tem sido objeto de pesquisas em diversas instituições em todo o mundo. Trata-se de um assunto complexo, ainda com muitos possíveis caminhos a serem investigados para o aperfeiçoamento das normas técnicas de projeto e construção da infra-estrutura rodoviária. No Brasil ainda é relativamente pequeno o número de pesquisas visando avaliar os efeitos das cargas dinâmicas do tráfego, sendo, portanto, adotados métodos de dimensionamento de pavimentos e pontes que nem sempre refletem a realidade operacional brasileira e que resultam, de uma maneira geral, em obras sub ou superdimensionadas. Particularmente, no que diz respeito às cargas dinâmicas, tem-se, sempre, uma situação de subdimensionamento.

A maioria dos problemas associados à segurança, economia e qualidade total do transporte rodoviário depende das características dos pavimentos e dos veículos e do modo como esses dois sistemas dinâmicos interagem. A ação dos veículos nos pavimentos e nas pontes, de caráter dinâmico, é influenciada por diversos fatores de tráfego, tais como carga por eixo, pressão de enchimento dos pneus, tipo de pneu, tipo de rodagem, tipo de veículo, tipo de suspensão e velocidade dos veículos (Fernandes Jr., 1994). Também é importante a condição da superfície de rolamento, particularmente a irregularidade longitudinal.

Embora existam alguns métodos experimentais (OECD, 1999) capazes de analisar parâmetros de projeto associados aos efeitos dinâmicos do tráfego de veículos, o custo relativamente alto destes ainda inviabiliza a utilização em projetos convencionais e até mesmo a realização de pesquisas análogas no Brasil. Os métodos computacionais, mais acessíveis, apresentam-se como uma

alternativa viável, talvez única no curto prazo, para a realização desses estudos. Dessa forma, o desenvolvimento deste trabalho teve como ferramenta básica o programa computacional *TruckSim*, através do qual as simulações de cargas foram realizadas em conformidade com os padrões técnicos das rodovias, pontes e veículos brasileiros.

2. PROGRAMA COMPUTACIONAL *TRUCKSIM*

2.1. Informações Gerais

Desenvolvido pelo UMTRI - *The University of Michigan Transportation Research Institute*, o *TruckSim* é um programa computacional baseado em modelos matemáticos de veículos que foram validados através de comparações com outros modelos existentes e com resultados de testes de campo, permitindo a análise de vários tipos de veículos mediante composição de diferentes características de sistemas de suspensão, direcionamento, carregamento, eixos e pneus, velocidade, aceleração e frenagem. Com a utilização do *TruckSim* e considerando-se as características dos veículos rodoviários de carga e da condição dos pavimentos típicas da realidade brasileira, foram obtidos os efeitos dos diversos fatores de tráfego e da irregularidade longitudinal dos pavimentos.

2.2. Sistemas Dinâmicos

Um sistema dinâmico qualquer é composto por massa (m), rigidez (k) e amortecimento (c), cujas propriedades dinâmicas são avaliadas mediante uma carga aplicada ($P(t)$) ou uma vibração estimulada por algum fator externo. Segundo Thomson (1978), grau de liberdade refere-se ao número de coordenadas independentes requerido para a descrição do movimento de um sistema. Se um sistema dinâmico movimentar-se em apenas uma direção (z), pode-se representá-lo através da equação 1, para sistemas com um grau de liberdade:

$$m\ddot{z} + c\dot{z} + kz = P(t) \quad (1)$$

Um modelo matemático de veículo bastante simples é o modelo "quarto-de-carro" (*quarter-car*), com dois graus de liberdade, que é

utilizado para calibrar equipamentos do tipo resposta na avaliação da irregularidade longitudinal de pavimentos (Figura 1).

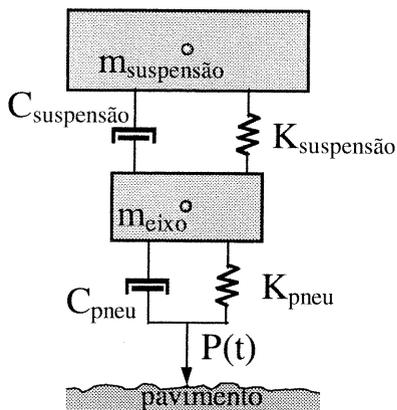


Figura 1: Modelo quarto-de-carro (adaptado de Cebon, 1993).

2.3. Modelos Matemáticos de Veículos

Os modelos matemáticos de caminhões são, no entanto, mais complexos (Figura 2). Os modelos utilizados no *TruckSim* variam de um caminhão de dois eixos, equivalente a um sistema com 26 graus de liberdade, até um modelo de caminhão semi-reboque, com 67 graus de liberdade. Neste caso, a equação do movimento dos sistemas (com n graus de liberdade) é composta pelos elementos das matrizes de massa, amortecimento e rigidez, e os elementos dos vetores aceleração, velocidade e força externa (equação 2).

$$[m] \ddot{\{z\}} + [c] \dot{\{z\}} + [k] \{z\} = \{P(t)\} \quad (2)$$

2.4. Pavimentos Rodoviários

A análise do movimento de um veículo sobre o pavimento considera, além do fator tempo (t), o fator espaço (x), que se refere à direção longitudinal de deslocamento do veículo (perfil longitudinal do pavimento). Nesse caso, a equação 1, resulta em:

$$m \ddot{z}_{(t,x)} + c \dot{z}_{(t,x)} + k z_{(t,x)} = P(z(t,x)) \quad (3)$$

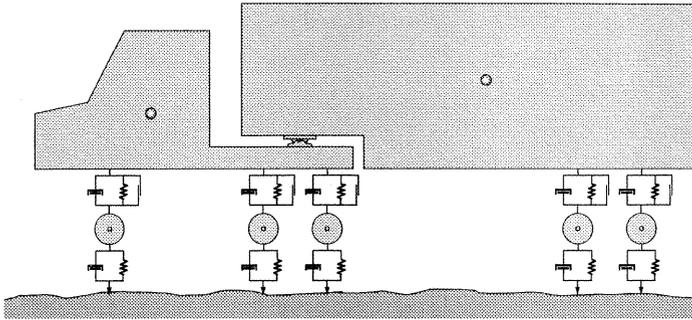


Figura 2: Modelo de um veículo semi-reboque (adaptado de UMTRI, 1993).

O perfil longitudinal de um pavimento é representado por dimensões horizontais e verticais relativas a um referencial adotado, sendo determinado pelas irregularidades dos pavimentos. Neste trabalho foram estudadas diferentes classes de pavimentos segundo o IRI (*International Roughness Index*), que é um índice estatístico que mede, em metros por quilômetro (m/km), a irregularidade do pavimento em relação ao perfil longitudinal do mesmo. Segundo Sayers & Karamihas (1997), as medidas do IRI de diferentes estados e países são amplamente compatíveis. Os modelos de pavimentos usados no *TruckSim* consideram o perfil da estrada como parâmetro de entrada.

3. QUANTIFICAÇÃO DOS EFEITOS DAS CARGAS DINÂMICAS

Neste trabalho considera-se como parâmetro de comparação, entre as cargas dinâmicas e estáticas, um coeficiente de impacto (f), que é expresso pela relação entre a carga dinâmica vertical máxima (Fz_{\max}) e a carga estática (Fz_{est}) aplicada no eixo do veículo trafegando sobre um perfil de pavimento. Esse coeficiente é dado pela equação 4.

$$f = \frac{Fz_{\max}}{Fz_{\text{est}}} \quad (4)$$

Fisicamente, isso significa que a carga vertical máxima, causada pelo impacto dinâmico, pode ser até f vezes a carga estática considerada.

Ou seja, para um pavimento ideal ($IRI=0$) tem-se $Fz_{max} = Fz_{est}$, logo $f = 1,0$.

4. ANÁLISE DOS FATORES SIMULADOS

A seguir é apresentada uma análise dos fatores que influenciam o comportamento das cargas dinâmicas dos veículos rodoviários sobre os pavimentos e pontes mediante apresentação dos resultados das simulações realizadas com o *TruckSim*.

4.1. Irregularidade Longitudinal

A irregularidade longitudinal foi avaliada sob três aspectos: saliência ou depressão isolada, perfil longitudinal (diferentes níveis de IRI) e o impacto devido à irregularidade nas pontes.

4.1.1. Saliência ou Depressão Isolada

As geometrias consideradas visam simular os efeitos sobre as cargas dinâmicas dos defeitos “panela” e desnível entre pavimentos e pontes (interface), e também de um redutor de velocidade (sonorizador), conforme mostrado na figura 3.

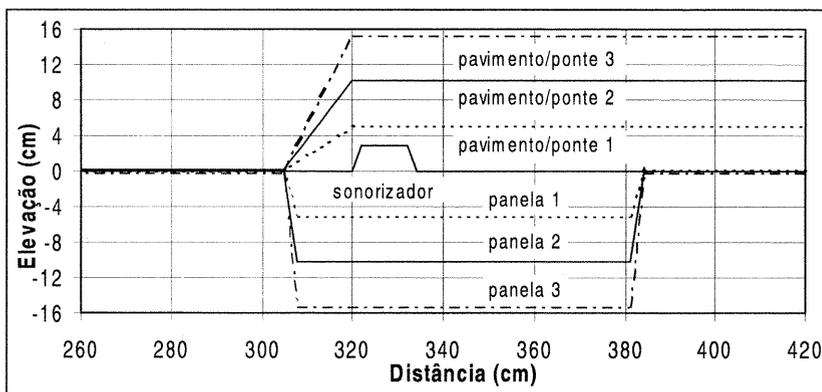


Figura 3: Saliência ou depressão isolada: painelas, desnível pavimento/ponte e sonorizador.

A figura 4 mostra a carga dinâmica vertical máxima ($F_{z_{max}}$) em função da carga estática considerada na simulação ($F_{z_{est}}$) com o veículo "toco", trafegando a uma velocidade de 90 km/h sobre as irregularidades apresentadas na figura 3. Mostra ainda o limite legal de carga (LL) estabelecido pelo CONTRAN, para efeito comparativo.

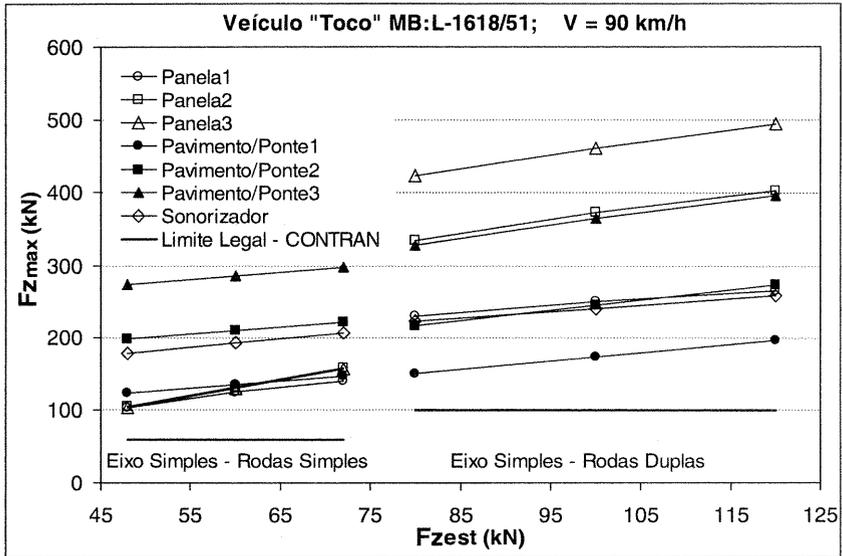


Figura 4: Carga vertical máxima em função da carga vertical estática, para veículo "toco" a 90 km/h sobre painelas, desníveis pav./ponte e sonorizador.

Observa-se a partir da figura 4 que, para uma mesma velocidade, $F_{z_{max}}$ aumenta linearmente com o aumento de $F_{z_{est}}$ e que o impacto dinâmico provocado por ambos os tipos de irregularidades gera uma sobrecarga significativa no pavimento. Tal fato pode também ser observado na tabela 1, que mostra os coeficientes de impacto dinâmico (f), obtidos da equação 4.

Como pode ser observado na tabela 1, os coeficientes de impacto (f) apresentaram valores extremamente elevados. Por exemplo, para a "painela" do tipo 3, a carga vertical máxima devido ao impacto decorrente da irregularidade do pavimento pode ser até 4,62 vezes a carga estática considerada (LL).

Tabela 1: Coeficientes de impacto (f) do veículo “toco” a 90 km/h, com limite legal de carga, sobre painéis, desníveis pavimento/ponte e sonorizador.

| Eixo | Eixo Simples – Rodas Simples | | | Eixo Simples – Rodas Duplas | | | Peso Bruto Total Combinado | | |
|----------------|------------------------------|------------|------|-----------------------------|------------|------|----------------------------|------------|------|
| Carga aplicada | LL = 60 kN | | | LL = 100 kN | | | LL = 160 kN | | |
| Irregularidade | Desvio | | | Desvio | | | Desvio | | |
| | Fz_{max} | Padrão (s) | f | Fz_{max} | Padrão (s) | f | Fz_{max} | Padrão (s) | f |
| Panela 1 | 124,5 | 8,3 | 2,08 | 250,9 | 13,1 | 2,51 | 311,6 | 15,6 | 1,95 |
| Panela 2 | 131,9 | 9,6 | 2,20 | 373,1 | 21,7 | 3,73 | 433,6 | 23,9 | 2,71 |
| Panela 3 | 130,3 | 9,4 | 2,17 | 461,9 | 26,2 | 4,62 | 522,6 | 28,0 | 3,45 |
| Pav/Ponte 1 | 135,5 | 7,7 | 2,26 | 173,6 | 13,4 | 1,74 | 235,5 | 16,1 | 1,47 |
| Pav/Ponte 2 | 210,9 | 16,2 | 3,52 | 245,1 | 25,5 | 2,45 | 310,9 | 30,0 | 1,94 |
| Pav/Ponte 3 | 286,3 | 24,7 | 4,77 | 364,9 | 36,4 | 3,65 | 394,8 | 42,0 | 2,47 |
| Sonorizador | 194,0 | 4,1 | 3,23 | 240,0 | 4,1 | 2,40 | 300,8 | 5,9 | 1,88 |

4.1.2 Perfil Longitudinal

Três perfis longitudinais de pavimentos foram avaliados em termos de irregularidade longitudinal (IRI), cujas características são apresentadas na tabela 2. Como o programa *TruckSim* considera apenas o perfil do pavimento, os tipos e as propriedades físicas dos materiais não influenciam os resultados das simulações.

Tabela 2: Perfis de pavimentos simulados para avaliação da irregularidade longitudinal.

| Pavimento | IRI (m/km) | Descrição |
|----------------|------------|---|
| <i>Goodpcc</i> | 1,6 | Pavimento bom, em concreto de cimento Portland |
| <i>Roughac</i> | 3,5 | Pavimento em concreto asfáltico, com perfil irregular |
| <i>Wavyst</i> | 4,4 | Pavimento asfáltico com tratamento superficial ondulado |

Nas simulações realizadas sobre irregularidades isoladas, o impacto dinâmico gera sobrecargas seguidas de alívios, que vão sendo dissipados até atingir o valor da carga estática. Nas simulações sobre perfis de pavimentos ocorre a mesma coisa, no entanto, as irregularidades sucessivas fazem com que ocorram picos de

sobrecarga e alívio ao longo de todo o perfil, conforme mostrado na figura 5. A média das cargas verticais observadas também aproxima-se do valor da carga estática.

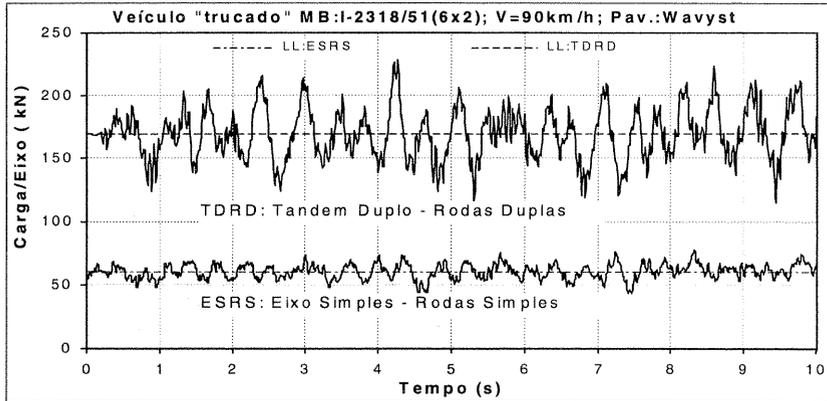


Figura 5: Simulação de um veículo "trucado" a 90 km/h sobre o pavimento Wavyst.

A figura 6 mostra a carga dinâmica vertical máxima em função da velocidade e, ainda, o efeito da irregularidade longitudinal (IRI) sobre a carga dinâmica para diferentes velocidades.

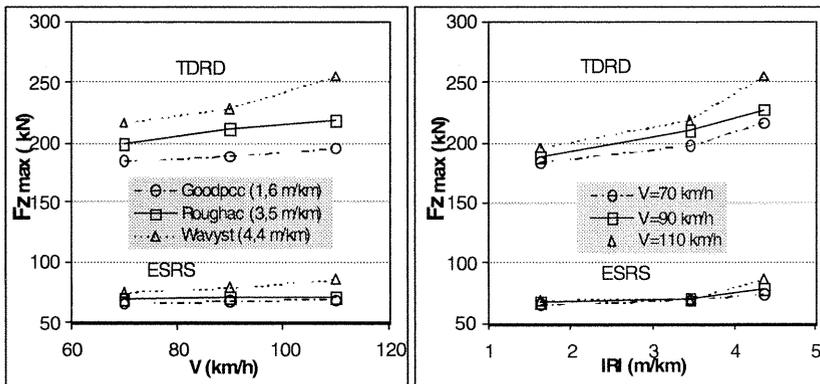


Figura 6: Carga vertical máxima em função da velocidade e do IRI, para o veículo "trucado" com limite legal de carga.

A velocidade exerce pouca influência para baixos níveis de irregularidade, sendo mais significativa para maiores valores de IRI. Observa-se um comportamento não linear de Fz_{max} em função do IRI, sendo mais significativo o efeito para maior velocidade e maior IRI.

A tabela 3 mostra os coeficientes de impacto (f) para as simulações sobre os perfis de pavimentos. Conforme esperado, os coeficientes de impacto são menores que aqueles obtidos para as irregularidades longitudinais isoladas e o efeito dinâmico também é mais significativo para níveis de irregularidade mais elevados.

Tabela 3: Coeficientes de impacto do veículo “trucado” a 90 km/h, com limite legal de carga, sobre perfis de pavimentos.

| Eixo | ESRS | | | TDRD | | | PBTC | | |
|----------------------|------------|-----|------|-------------|------|------|-------------|------|------|
| Carga aplicada | LL = 60 kN | | | LL = 170 kN | | | LL = 230 kN | | |
| $Pav(IRI:m/km)$ | Fz_{max} | s | f | Fz_{max} | s | f | Fz_{max} | s | f |
| <i>Goodpcc (1,6)</i> | 67,6 | 2,7 | 1,13 | 188,6 | 6,3 | 1,11 | 251,1 | 6,3 | 1,09 |
| <i>Roughac</i> | 70,7 | 3,9 | 1,18 | 211,2 | 11,7 | 1,24 | 268,1 | 11,6 | 1,17 |
| <i>Wavyst</i> | 78,1 | 5,9 | 1,30 | 227,8 | 20,2 | 1,34 | 292,0 | 20,6 | 1,27 |

4.1.3. Pontes

De acordo com a NBR 7187 (ABNT, 1986), o efeito das cargas móveis nas pontes deve ser analisado pela teoria da Dinâmica das Estruturas. É permitido, no entanto, assimilar as cargas móveis a cargas estáticas, através de uma simplificação por coeficientes de impacto (ϕ) em função do vão teórico do elemento estrutural carregado que, nos elementos estruturais de obras rodoviárias, é definido pela equação 5, que resulta em uma variação de 1,0 a 1,4.

$$\phi = 1,4 - 0,007 L \geq 1,00 \quad (5)$$

Para análise comparativa foram usados os resultados obtidos com o veículo “trucado” trafegando sobre dois tipos de pavimentos de concreto de cimento Portland (*Goodpcc*: Pavimento bom - IRI = 1,6

m/km e; *Faultpcc*: Pavimento com defeitos - IRI = 3,4 m/km). Os coeficientes de impacto (f) são apresentados na tabela 4.

Tabela 4: Coeficientes de impacto do veículo “trucado” trafegando sobre os perfis de pavimento *Faultpcc* e *Goodpcc*.

| Carga (kN) | LL-20% | | | LL | | | LL+20% | | | EIXO |
|-----------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|---------|
| | 70 | 90 | 110 | 70 | 90 | 110 | 70 | 90 | 110 | |
| V (km/h) | | | | | | | | | | LL (kN) |
| <i>Faultpcc</i> | 1,177 | 1,248 | 1,267 | 1,154 | 1,219 | 1,204 | 1,132 | 1,190 | 1,167 | ESRS |
| <i>Goodpcc</i> | 1,104 | 1,141 | 1,157 | 1,094 | 1,127 | 1,139 | 1,079 | 1,111 | 1,122 | 60 kN |
| <i>Faultpcc</i> | 1,220 | 1,209 | 1,286 | 1,182 | 1,237 | 1,272 | 1,144 | 1,228 | 1,246 | TDRD |
| <i>Goodpcc</i> | 1,097 | 1,116 | 1,135 | 1,086 | 1,109 | 1,152 | 1,078 | 1,099 | 1,146 | 170 kN |

Para pavimentos em condições de boas a regulares, os coeficientes de impacto utilizados em projetos de pontes (ϕ) apresentam valores compatíveis com aqueles simulados (f), ou seja, os valores apresentados na tabela 4 estão dentro do intervalo de coeficientes de impactos estabelecidos pela norma de pontes NBR 7187 (ABNT, 1986).

Nota-se que alguns coeficientes obtidos através das simulações atingiram valores próximos a 1,3 para o pavimento *Faultpcc*. Com base nos resultados obtidos em função da variação no IRI, estimam-se valores de coeficiente de impacto muito mais elevados para pontes com superfície de rolamento deteriorada.

4.2. Veículos

Os fatores analisados referem-se às propriedades dinâmicas dos veículos. São eles: carga por eixo e tipo de eixo, sistema de suspensão e velocidade.

4.2.1. Carga por Eixo – Tipo de Eixo

A análise foi feita considerando-se o valor médio dos coeficientes de impacto obtidos para três tipos de eixos em diferentes veículos trafegando sobre o perfil *Wavyst* a uma velocidade de 90 km/h, com diferentes carregamentos (tabela 5). Os resultados obtidos indicam

que não há variação do coeficiente de impacto com a carga por eixo, pois todos os valores obtidos, independentemente da carga e do tipo de eixo, ficaram muito próximos do coeficiente de impacto médio (1,31, com médias de 1,32, 1,29 e 1,32, respectivamente para eixo dianteiro, eixo simples com rodas duplas e tandem duplo). Tal fato mostra que a irregularidade longitudinal e as propriedades dinâmicas dos veículos exercem significativa influência na carga por eixo que efetivamente atua no pavimento. Vale ressaltar que tal análise foi feita para um pavimento em condições regulares a ruins (IRI = 4,4 m/km), sendo que no Brasil tem-se pavimentos em condições ainda piores, o que elevaria os valores dos coeficientes de impacto.

Tabela 5: Coeficientes de impacto de eixos trafegando a 90 km/h, sobre o perfil *Wavyst*.

| EIXO | Eixo Simples – Rodas Simples | | | | Eixo Simples – Rodas Duplas | | | | Tandem Duplo – Rodas Duplas | | | |
|------------------------------|------------------------------|------|--------|-------|-----------------------------|------|--------|-------|-----------------------------|------|--------|-------|
| Configuração | | | | | | | | | | | | |
| Veículo \ Carga | LL-20% | LL | LL+20% | Média | LL-20% | LL | LL+20% | Média | LL-20% | LL | LL+20% | Média |
| Toco | 1,32 | 1,33 | 1,35 | 1,33 | 1,23 | 1,31 | 1,30 | 1,28 | - | - | - | - |
| Trucado | 1,34 | 1,30 | 1,27 | 1,30 | - | - | - | - | 1,36 | 1,34 | 1,31 | 1,34 |
| Semi Cav ⁽¹⁾ | 1,36 | 1,31 | 1,26 | 1,31 | 1,36 | 1,34 | 1,30 | 1,34 | - | - | - | - |
| 3E Reb ⁽²⁾ | - | - | - | - | 1,28 | 1,23 | 1,20 | 1,24 | - | - | - | - |
| Semi Cav | 1,36 | 1,33 | 1,30 | 1,33 | - | - | - | - | 1,31 | 1,30 | 1,30 | 1,30 |
| 5E Reb | - | - | - | - | - | - | - | - | 1,37 | 1,33 | 1,28 | 1,33 |
| Média | 1,34 | 1,32 | 1,30 | 1,32 | 1,30 | 1,30 | 1,27 | 1,29 | 1,35 | 1,33 | 1,30 | 1,32 |
| Classificação ⁽³⁾ | Segundo | | | | Primeiro | | | | Terceiro | | | |

(1) Cavalo-mecânico; (2) Semi-reboque;

(3) Classificação segundo o coeficiente de impacto médio.

Se considerarmos o comportamento do mesmo tipo de eixo em diferentes veículos, a partir do coeficiente de impacto médio (tabela 5), os eixos em tandem duplo (TDRD) resultam em maiores cargas dinâmicas, com os eixos simples com rodas simples (ESRS) ocupando uma posição intermediária e os eixos simples com rodas duplas

(ESRD) sendo os menos danosos aos pavimentos. No entanto, os coeficientes de impacto de um determinado tipo de eixo também dependem da configuração do veículo, não avaliada neste trabalho.

4.2.2. Suspensão

O *TruckSim* permite a análise comparativa do efeito da rigidez do sistema de suspensão sobre as cargas dinâmicas. Para o veículo “trucado” foram simulados modelos de suspensões em feixe de molas com menor rigidez que a rigidez padrão, para três níveis de irregularidade (perfis apresentados na tabela 2).

Os resultados mostraram que menor rigidez do sistema de suspensão resulta em menor carga dinâmica máxima ($F_{z_{max}}$) para menor índice de irregularidade e menor carga por eixo. Entretanto, menor rigidez resulta em maior carga dinâmica para maior irregularidade e maior carga por eixo. Tal fato apenas não se verificou para o pavimento *Roughac*, em que a carga dinâmica máxima obtida para o sistema de suspensão padrão foi superior à obtida para o sistema de menor rigidez. A Tabela 6 apresenta os coeficientes de impacto calculados para o eixo dianteiro (ESRS) do veículo “trucado”.

Observa-se na tabela 6 que, para baixos níveis de irregularidade (*Goodpcc*), o sistema de suspensão menos rígido apresenta menores coeficientes de impacto. Já para maiores níveis de irregularidade (*Wavyst*), o sistema menos rígido apresenta maiores coeficientes de impacto que o sistema padrão apenas para cargas por eixo elevadas.

4.2.3 Velocidade

A influência da velocidade do veículo sobre os diversos tipos de saliências e depressões isoladas e perfis longitudinais de pavimentos foi avaliada para diferentes condições de carregamento. Vale aqui ressaltar alguns desses resultados:

- “*Panela*”: para eixos simples de rodas simples (ESRS) ocorre uma redução da carga vertical máxima ($F_{z_{max}}$) com o aumento da velocidade, enquanto para eixos simples com rodas duplas

(ESRD) ocorre um aumento de $F_{z_{max}}$, ocorrendo um valor máximo para a velocidade de 90 km/h, seguido de uma redução para velocidade de 110 km/h;

Tabela 6: Coeficientes de impacto para o eixo dianteiro do veículo “trucado” com suspensão em feixe de molas com menor rigidez e rigidez padrão.

| ESRS – Eixo Simples com Rodas Simples | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------------------------|---------------------|--------|------|------|------------|--------|------|------|------------|--------|------------|------|-----------|-----------|------|------|-----------|-----------|------|------|
| Carga Aplicada | LL-20% = 48 kN | | | | LL = 60 kN | | | | LL = 72 kN | | | | | | | | | | | |
| | Vel. (km/h) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Paviment | Tipo Susp. | 70 | | | 90 | | | 110 | | | Tipo Susp. | 70 | | | 90 | | | 110 | | |
| | Goodpc _c | Padrão | 1,10 | 1,14 | 1,16 | padrão | 1,09 | 1,13 | 1,14 | padrão | 1,08 | 1,11 | 1,12 | < rigidez | 1,07 | 1,10 | 1,11 | < rigidez | 1,06 | 1,09 |
| < rigidez | | 1,07 | 1,10 | 1,11 | < rigidez | 1,07 | 1,10 | 1,10 | < rigidez | 1,06 | 1,09 | 1,10 | < rigidez | 1,06 | 1,09 | 1,10 | < rigidez | 1,06 | 1,09 | 1,10 |
| Roughha _c | Padrão | 1,18 | 1,19 | 1,18 | padrão | 1,16 | 1,18 | 1,18 | padrão | 1,14 | 1,17 | 1,17 | < rigidez | 1,18 | 1,18 | 1,20 | < rigidez | 1,17 | 1,15 | 1,22 |
| | < rigidez | 1,18 | 1,18 | 1,20 | < rigidez | 1,19 | 1,16 | 1,21 | < rigidez | 1,17 | 1,15 | 1,22 | < rigidez | 1,17 | 1,15 | 1,22 | < rigidez | 1,17 | 1,15 | 1,22 |
| Wavyst | padrão | 1,27 | 1,34 | 1,42 | padrão | 1,24 | 1,30 | 1,43 | padrão | 1,21 | 1,27 | 1,43 | < rigidez | 1,21 | 1,30 | 1,37 | < rigidez | 1,27 | 1,33 | 1,53 |
| | < rigidez | 1,21 | 1,30 | 1,37 | < rigidez | 1,27 | 1,41 | 1,50 | < rigidez | 1,27 | 1,33 | 1,53 | < rigidez | 1,27 | 1,33 | 1,53 | < rigidez | 1,27 | 1,33 | 1,53 |

- *Sonorizadores:* para eixos simples de rodas simples (ESRS), ocorre um pequeno acréscimo de $F_{z_{max}}$ até determinado valor para a velocidade de 90 km/h, seguido de uma redução para velocidade de 110 km/h. Para eixos simples com rodas duplas (ESRD) ocorre um aumento da carga vertical máxima ($F_{z_{max}}$) com o aumento da velocidade;
- *Irregularidade longitudinal:* a velocidade exerce pouca influência para baixos níveis de irregularidade, sendo mais significativa para maiores valores de IRI (figura 6).

5. ANÁLISE ESTATÍSTICA

Fernandes, Jr. & Barbosa (1999) apresentam modelos para previsão dos efeitos das cargas dinâmicas (coeficientes de impacto, f), tanto para eixos simples com rodas simples como para tandem duplo com rodas duplas, que foram desenvolvidos a partir de análise estatística dos resultados das simulações realizadas com o TruckSim.

$$f_{ES} = 1,21 + 0,04 \times P_1(V) + 0,12 \times P_1(I) + 0,01 \times P_2(I) + 0,01 \times P_1(C) \times P_1(S) + 0,04 \times P_1(V) \times P_1(I) + 0,02 \times P_1(I) \times P_1(S)$$

$$R^2 = 0,96 \quad (6)$$

$$f_{TD} = 1,22 - 0,01 \times P_1(C) + 0,06 \times P_1(V) + 0,01 \times P_2(V) + 0,12 \times P_1(I) + 0,02 \times P_1(S) + 0,05 \times P_1(V) \times P_1(I)$$

$$R^2 = 0,96 \quad (7)$$

Onde:

$$P_1(C) = \left(\frac{C - 60}{12} \right), \text{ para eixo simples, rodas simples}$$

$$P_1(C) = \left(\frac{C - 170}{34} \right), \text{ para tandem duplo, rodas duplas}$$

C = carga por eixo (kN)

$$P_1(V) = \left(\frac{V - 90}{20} \right)$$

V = velocidade (km/h)

$$P_1(I) = \left(\frac{I - 3}{1,4} \right)$$

I = irregularidade longitudinal (IRI)

$$P_1(S) = \pm 1$$

menor rigidez = -1, suspensão padrão = +1

$$P_2(I) = 3 \times \left[\left(\frac{I-3}{1,4} \right)^2 - \frac{2}{3} \right]$$

$$P_2(V) = 3 \times \left[\left(\frac{V-90}{20} \right)^2 - \frac{2}{3} \right]$$

A irregularidade longitudinal do pavimento apresentou o maior valor do parâmetro F, utilizado no teste de significância de Snedecor, tanto para o eixo simples com rodas simples (ES-RS) como para o eixo em tandem duplo com rodas duplas (TD-RD). Para o eixo simples, a velocidade, a interação entre a irregularidade longitudinal e a velocidade, a interação entre a carga por eixo e a rigidez do sistema de suspensão, e a interação entre a irregularidade e a rigidez do sistema de suspensão também mostraram-se significativas. Para o tandem duplo, além da irregularidade longitudinal, também foram significativas a velocidade, a carga por eixo, a rigidez do sistema de suspensão e a interação entre a irregularidade longitudinal e a velocidade. Para ilustrar os resultados obtidos, apresentam-se nas Figuras 7 e 8 os coeficientes de impacto calculados, com base nos modelos apresentados, em função da velocidade e da irregularidade do pavimento.

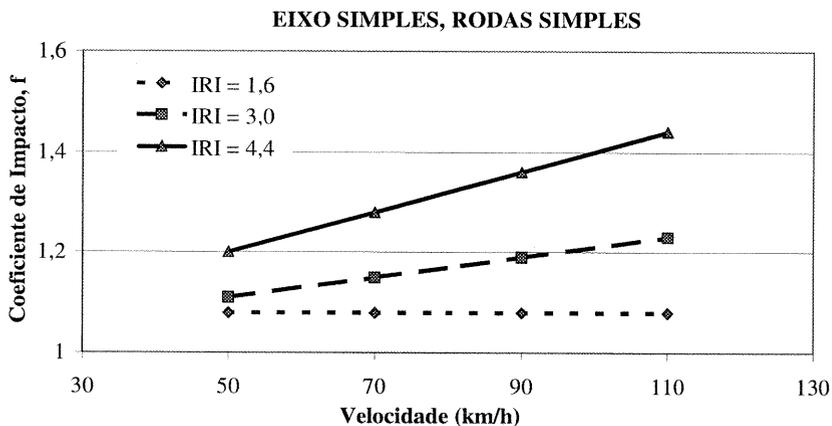


Figura 7: Coeficiente de Impacto para Eixo Simples, Rodas Simples.

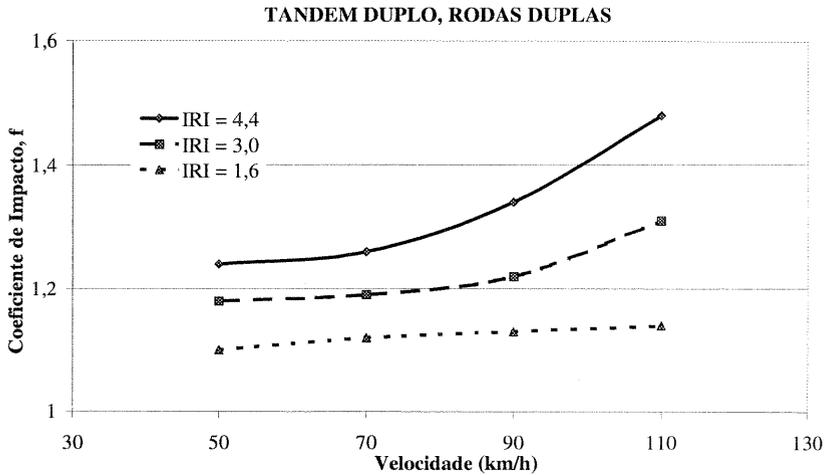


Figura 8: Coeficiente de Impacto para Tandem Duplo, Rodas Duplas.

6. CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS FINAIS

Este trabalho, ao utilizar um modelo analítico validado por ensaios de campo e por outros modelos, procurou fornecer subsídios para uma análise mais racional dos efeitos dinâmicos dos veículos sobre os pavimentos e pontes rodoviárias. As propriedades dinâmicas dos veículos e fatores de tráfego exercem significativa influência nas cargas dinâmicas, mostrando que há necessidade de realização de estudos adicionais para a consideração desses fatores nos projetos de pavimentos.

As saliências e depressões isoladas simuladas (“panelas”, desníveis pavimento/ponte e sonorizador) resultaram em valores extremamente elevados de coeficientes de impacto (f), mostrando que o efeito desses tipos de irregularidades sobre as cargas dinâmicas é bastante significativo. Os perfis de pavimentos simulados apresentaram resultados menos significativos, mas também muito superiores às cargas estáticas consideradas, sobretudo para maiores níveis de irregularidade longitudinal dos pavimentos (IRI).

A elevada magnitude das cargas dinâmicas ressalta a importância da consideração dos efeitos dinâmicos dos veículos rodoviários no dimensionamento estrutural e nos modelos de desempenho de pavimentos. Deve-se destacar, também, o efeito preponderante da irregularidade longitudinal sobre os outros fatores considerados, numa clara indicação de que a melhor maneira de se reduzir os efeitos deletérios das cargas dinâmicas é a manutenção dos pavimentos em boas condições de rolamento.

AGRADECIMENTO

A realização deste trabalho contou com o auxílio financeiro da FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) na forma de uma bolsa de Mestrado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT (1986) *NBR 7187 - Projeto e Execução de Pontes de Concreto Armado e Protendido, NBR 7188 - Carga Móvel em Ponte Rodoviária*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro/RJ.
- Cebon, D. (1993) *Interaction Between Heavy Vehicles and Roads*. Society of Automotive Engineers, Inc., Warrendale, PA.
- Fernandes Jr., J.L. e R.E. Barbosa (1999) *Análise da Influência de Fatores do Tráfego e da Condição dos Pavimentos sobre as Cargas Dinâmicas dos Veículos Rodoviários*. X Congresso Ibero-Latinoamericano de Asfalto, Sevilha, Espanha, novembro de 1999.
- Fernandes Jr., J.L. (1994) *Investigação dos Efeitos das Solicitações do Tráfego Sobre o Desempenho de Pavimentos*. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos/SP.
- OECD (1999) *DIVINE – Dynamic Interaction Between Vehicles and Infrastructure Experiment*. Road Transport and Intermodal Research. Organisation for Economic Co-operation and Development. Paris, France.

- Sayers, M.W. e S.M. Karamihas (1997) *The Little Book of Profiling – Basic Information about Measuring and Interpreting Road Profiles*. UMTRI – The University of Michigan Transportation Research Institute, Ann Arbor/MI.
- Sória, M.H.A. (1996) *As Bases Racionais dos Métodos Empíricos de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis*. Tese de Livre-Docência, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos/SP.
- Souza, M.L. (1981) *Método de Projeto de Pavimentos Flexíveis*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem-DNER.
- Thomson, W.T. (1978) *Teoria da Vibração com Aplicações*. Tradução de Cássio Sigaud; Editora Interciência, Rio de Janeiro, RJ.
- UMTRI (1993) *The Mechanics of Heavy-Duty Trucks and Truck Combinations*. University of Michigan Transportation Research Institute, U. M. Engineering Conferences Vol.1, Ann Arbor, MI.

Endereço dos autores:

José Leomar Fernandes Júnior
STT/EESC/Universidade de São Paulo
End.: Av. Dr. Carlos Botelho, 1465; STT/EESC/USP
CEP:13560-250 - São Carlos/SP
e-mail: leomar@sc.usp.br

Rone Evaldo Barbosa
FCET/UEG - Universidade Estadual de Goiás
End.: Av. JK, nº 146; UEG/FCET; Bairro Jundiáí
CEP:75110-390 - Anápolis/GO
e-mail: rone@genetic.com.br