

# **ANÁLISE DO EFEITO DO TRÁFEGO DE VEÍCULOS PESADOS SOBRE UMA PONTE ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO MICROSCÓPICA**

**Juliana Jerônimo de Araújo**

**José Reynaldo A. Setti**

Universidade de São Paulo

Escola de Engenharia de São Carlos

## **RESUMO**

O objetivo deste trabalho foi desenvolver um método para estabelecer o efeito das características e da operação dos veículos pesados sobre uma ponte através do uso de resultados de simulação microscópica de tráfego. Para isso, foi necessária a aquisição de um conjunto de dados sobre as características de veículos pesados e a obtenção de um modelo de simulação calibrado para um trecho de rodovia de pista dupla. A metodologia desenvolvida é demonstrada através da realização de um estudo de caso em que foram simulados dois cenários de tráfego e em que foi considerada uma ponte hipotética com 100 m de extensão. Os resultados do estudo de caso demonstram a viabilidade do procedimento proposto.

## **ABSTRACT**

The objective of this research was to develop a method for establishing the effect of heavy vehicles characteristics and operation on a highway bridge by using the results of a microscopic traffic simulation model. Therefore, it was necessary to acquire a database with the characteristics of these vehicles and to calibrate a traffic simulation model for a multilane highway. The developed methodology is demonstrated through a case study in which two traffic scenarios were simulated and in which a hypothetical 100 m bridge was considered. The case study results demonstrate the proposed procedure viability.

## **1. INTRODUÇÃO**

Segundo a Confederação Nacional do Transporte (2006), em 2005, o transporte de 47,5% da carga brasileira foi feito pelo modo rodoviário, com mais de 790 milhões de toneladas transportadas por uma frota que ultrapassa os dois milhões de veículos pesados. Nesse cenário, os veículos pesados desempenham um papel relevante, suscitando a necessidade de analisar o impacto que eles ocasionam não somente em termos de operação, como também no projeto e na manutenção da infra-estrutura rodoviária.

De forma geral, as leis que regulamentam os pesos e as dimensões dos veículos pesados visam reduzir o impacto provocado pelo seu tráfego. Na fase de projeto da infra-estrutura rodoviária, fatores tais como largura de faixas de rolamento, alinhamento horizontal de curvas e espessura do pavimento estão diretamente relacionados às características dos veículos pesados. Na fase de manutenção, essas características estão ligadas ao desgaste dos pavimentos e pontes.

Um aspecto a ser notado é que o constante desenvolvimento da indústria de transporte rodoviário e o conseqüente aumento das cargas transportadas pelos veículos podem ocasionar desgastes maiores do que os previstos tanto para a pavimentação quanto para as pontes e viadutos. Portanto, é desejável aperfeiçoar a determinação de como a ação do carregamento móvel é levada em consideração durante o processo de dimensionamento da infra-estrutura rodoviária.

## **2. OBJETIVO**

A meta principal deste trabalho é desenvolver uma metodologia para estabelecer o efeito das características e da operação dos veículos pesados sobre uma ponte através do uso de resultados de simulação microscópica de tráfego. Para tanto, foram estabelecidos dois objetivos secundários: 1) aquisição de um conjunto de dados com amostra de tamanho significativo sobre as diversas características de veículos pesados; e 2) obtenção de um modelo de simulação de

tráfego calibrado para um trecho de rodovia de pista dupla.

A metodologia proposta combina esses dois aspectos na medida em que associa dados microscópicos extraídos de um simulador a um banco de dados detalhado sobre as características dos veículos pesados para obter um carregamento móvel decorrente do tráfego desses veículos. Para demonstrar como a metodologia desenvolvida pode ser utilizada, efetuou-se um estudo de caso que calculou o efeito ocasionado pela presença simultânea de veículos pesados sobre uma ponte, a fim de compará-lo com o provocado pelo trem-tipo estabelecido pela norma brasileira.

### **3. JUSTIFICATIVA**

O dimensionamento de pontes leva em conta vários fatores, sendo a ação do tráfego um dos mais significativos. O valor real do carregamento do tráfego é considerado difícil de modelar de uma forma precisa devido à sua aleatoriedade e, por isso, os engenheiros estruturais costumam fazer várias simplificações para tornar essa tarefa possível.

De acordo com a norma brasileira, NBR-7188, a ação das cargas móveis no processo de análise estrutural de pontes não corresponde aos veículos reais que trafegam sobre as mesmas, mas a um carregamento hipotético que tenta reproduzir as solicitações provocadas pelo tráfego (ABNT, 1984). Esse carregamento, que possui o nome de trem-tipo, consta de um veículo-tipo de peso e geometria estabelecidos pela própria norma e de cargas uniformemente distribuídas.

Um fato importante a ser observado é que, apesar das combinações de carga apresentadas na NBR-7188 terem como objetivo reproduzir as solicitações provocadas pelo tráfego real sobre as pontes, em nenhuma delas é prevista a passagem simultânea de dois ou mais veículos-tipo, ao contrário do que acontece nas situações reais de carregamento.

Dessa forma, este trabalho propõe como ferramenta de análise o uso de um modelo de simulação de tráfego capaz de representar adequadamente os fluxos observados em campo e que possua um bom nível de detalhamento. Os resultados da simulação fornecem dados importantes, como a probabilidade de ocorrência simultânea de veículos pesados na ponte e a posição relativa desses veículos. A associação dessas informações a um banco de dados que contém as características dos veículos pesados (tais como pesos por eixo e distâncias entre eixos) permite obter os carregamentos totais nas pontes e as localizações dessas cargas de uma forma mais realística, uma vez que leva em consideração os efeitos da composição do tráfego e da mecânica de *car-following* sobre o espaçamento e o *headway* entre veículos na corrente de tráfego.

### **4. CARREGAMENTO MÓVEL PARA ANÁLISE ESTRUTURAL DE PONTES**

O desenvolvimento de modelos de carregamento móvel vem sendo tema de vários estudos, principalmente no exterior. O interesse no assunto resulta da preocupação com a evolução da indústria de transporte rodoviário, que busca otimizar esse modo de transporte através do uso de veículos cada vez mais pesados, comprometendo a segurança das obras de arte especiais. No Brasil, os principais trabalhos que tratam das cargas móveis para a análise estrutural de pontes são recentes, uma vez que o foco principal das pesquisas realizadas sempre foi a análise e o dimensionamento de pavimentos (Luchi, 2006).

Os modelos desenvolvidos sobre o tema se baseiam fundamentalmente na teoria dos processos estocásticos, na concepção de configurações estáticas do tráfego ou na simulação do fluxo de

tráfego através do método de Monte Carlo (Ghosn e Moses, 1985; Nowak e Hong, 1991; Crespo-Minguillón e Casas, 1997; Luchi, 2006). Dentre eles, considera-se que os modelos de simulação de tráfego são os mais completos, apesar de uma de suas características ser a grande quantidade de dados que são necessários para a obtenção de um bom resultado.

Este trabalho utiliza o simulador de tráfego CORSIM para avaliar o impacto do tráfego de veículos pesados sobre uma ponte e procura levar em consideração um grande número de variáveis para que o modelo simule de forma realística o tráfego observado em uma rodovia de pista dupla típica no estado de São Paulo. A abordagem proposta evita os efeitos causados por suposições simplificadoras e incorpora os efeitos de *car-following* na modelagem do posicionamento de veículos pesados sobre as pontes.

## **5. O SIMULADOR CORSIM**

O CORSIM foi desenvolvido e é mantido pelo *Federal Highway Administration*. Nele, cada veículo é modelado individualmente e pode ser identificado pela sua classe (automóvel, caminhão, ônibus e *carpool*). Um total de nove tipos diferentes de veículos pode ser especificado para caracterizar as quatro classes.

O CORSIM é implementado em ambiente Windows através da interface TSIS que, através do pós-processador TRAFVU, permite que o usuário visualize a rede simulada graficamente e acompanhe seu desempenho. A resolução do CORSIM para descrever as operações do tráfego é de um segundo, ou seja, cada veículo é modelado como um objeto que se move a cada segundo, enquanto cada tipo de controle de tráfego na rede também é atualizado a cada segundo.

### **5.1. Rede simulada**

Neste trabalho, o modelo desenvolvido para a simulação faz a representação da Rodovia Washington Luís (SP-310), em seus dois sentidos de tráfego, no trecho que margeia a cidade de São Carlos - SP. A rede simulada tem extensão aproximada de 7,5 km e possui 11 acessos de entrada e saída no sentido Norte (capital-interior) e 16 acessos de entrada e saída no sentido Sul (interior-capital). A construção da rede foi baseada no projeto geométrico da rodovia.

## **6. COLETA DE DADOS**

Dois tipos de coletas de dados foram necessários. O primeiro deles estava relacionado aos dados de tráfego usados na simulação, que serviram para calibrar e validar o CORSIM, e o segundo, à caracterização da frota de veículos pesados que trafega no estado de São Paulo. Essa caracterização tornou possível a realização do estudo de caso proposto.

### **6.1. Dados para caracterização do tráfego e estimativa da matriz origem/destino**

Para esta pesquisa, além de dados caracterizando o fluxo e a composição do tráfego, também foram coletados dados de origem/destino e da velocidade da corrente de tráfego. A obtenção da matriz origem/destino foi considerada necessária para que pudesse representar o tráfego observado com o grau de fidelidade desejado. As observações de velocidade média da corrente de tráfego em postos de controle ao longo do trecho foram necessárias para o processo de calibração e validação do simulador.

Os dados para a caracterização dos fluxos de tráfego e para a estimativa das matrizes origem/destino foram coletados simultaneamente. O método de coleta utilizado foi a observação e o registro em planilhas, em intervalos de 15 minutos, do tipo de veículo e dos números exis-

tentes em sua placa. Para isso, foram escolhidos como postos de controle os viadutos localizados nos extremos do trecho de rodovia selecionado, as passarelas de pedestres localizadas em pontos intermediários e também os acessos de entrada e saída da rodovia. Câmeras de vídeo foram usadas nos postos de controle da SP-310. As informações relacionadas às coletas de dados estão contidas na Tabela 1.

**Tabela 1:** Informações sobre as coletas de dados

<i>Data da coleta</i>	<i>Horário</i>	<i>Postos de controle (SP-310)</i>	<i>Postos de controle (Acessos)</i>	<i>Pesquisadores envolvidos</i>
6/6/2005	10:00 – 12:00	6	27	23
13/6/2005	09:00 – 12:00	6	27	23
1/7/2005	14:00 – 17:00	8	27	25

Na análise dos dados coletados, verificou-se que os fluxos da primeira e da segunda coletas de dados mostraram-se bastante similares, uma vez que elas foram realizadas no mesmo dia da semana e no mesmo período, diferentemente da terceira coleta. Então, diante da necessidade de segregar os dados coletados em dois conjuntos isolados para fins de calibração e validação do modelo de simulação CORSIM, os dados da primeira e da segunda coletas de dados foram selecionados para a calibração e os dados da terceira coleta, para a validação.

Para definição da composição do tráfego, os veículos foram classificados em três categorias: automóveis, caminhões e ônibus. Entretanto, devido à combinação de alta velocidade, alto fluxo e posicionamento dos observadores em viadutos e passarelas, tornou-se inviável verificar o modelo e a configuração de eixos dos caminhões. Como esse dado é considerado de fundamental importância para o estudo de caso realizado, optou-se pela suposição de que a distribuição dos veículos pesados na rede simulada segue a observada em balanças localizadas em rodovias de pista dupla no estado de São Paulo (ver item 6.2).

As matrizes origem/destino obtidas são dinâmicas, uma vez que o registro da hora de passagem do veículo pelos postos de controle associado à categoria e à placa desse veículo permite fazer a análise para cada período de 15 minutos.

A definição da velocidade média da corrente de tráfego adotada é a média aritmética das velocidades pontuais de todos os veículos que passam por uma determinada seção da via. Durante o período de planejamento das coletas de dados, foi estabelecido que as velocidades pontuais dos veículos seriam obtidas usando o método da base longa como definido pelo DNIT (2006). Nesse método, é fixada uma distância em campo e calculado o tempo gasto para percorrê-la. A distância foi escolhida em função das linhas de divisão de fluxos de mesmo sentido que fazem parte da sinalização horizontal. No trecho estudado essas linhas são seccionadas. A medição em campo indicou que o padrão adotado no trecho estabelece uma distância 15,5 m. Como as imagens captadas pelas câmeras de vídeo permitiam a visualização de sucessivas linhas seccionadas, foi fixada uma seção de 62 m em cada posto de controle ao longo da SP-310. Esse valor corresponde à distância de quatro linhas seccionadas.

Para a obtenção do tempo gasto por cada veículo para percorrer a seção de 62 m de rodovia fez-se uso de uma macro no Microsoft Excel, escrita na linguagem VBA. A macro desenvolvida permitia a medição do tempo que um veículo demorava para transpor a seção, mediante a utilização do relógio do computador. Esse relógio era acionado através de teclas de atalho, re-

lacionadas à entrada e à saída do veículo na seção. Dessa forma, com quatro teclas de atalhos ativadas era possível registrar a entrada e a saída de todos os veículos em cada uma das duas faixas de tráfego de cada seção. Então, o comprimento da seção dividido pelo tempo gasto para percorrê-la fornece a velocidade, que pode ser considerada a velocidade pontual. A principal desvantagem na utilização desse método consiste no erro que deriva da decisão do pesquisador acerca dos instantes de passagem do veículo pelos extremos da seção.

## 6.2. Dados sobre as características dos veículos pesados

Para a caracterização da frota de veículos pesados que trafega nas rodovias de pista dupla do estado de São Paulo, foram realizadas coletas de dados em balanças localizadas em diferentes rodovias. A localização das balanças, as datas das coletas de dados e os tamanhos das amostras obtidas estão listados na Tabela 2. Esse conjunto de balanças foi escolhido para que tornasse possível a obtenção de uma amostra que representasse a variabilidade das características dos veículos pesados, em uma tentativa de caracterizar a frota que circula em São Paulo.

**Tabela 2:** Balanças rodoviárias



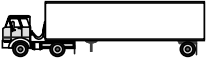

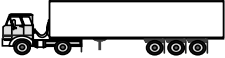



<i>Localização</i>	<i>Sentido</i>	<i>Data da coleta</i>	<i>Amostra</i>
SP-225 (km 224)	Oeste	28/9/2004	192
SP-330 (km 207)	Norte	7/10/2004	209
SP-330 (km 207)	Norte	16/2/2005	352
SP-330 (km 53)	Sul	1/3/2005	968
SP-330 (km 37)	Norte	2/3/2005	787
SP-348 (km 58)	Sul	8/3/2005	1.901
SP-348 (km 40)	Norte	9/3/2005	1.010
SP-310 (km 200)	Norte	12/8/2005	834

As coletas de dados nas balanças rodoviárias foram realizadas por dois pesquisadores, que registravam em planilha informações tais como marca, modelo, configuração de eixos dos veículos e existência de eixos erguidos. Essas informações foram utilizadas no levantamento da potência nominal dos veículos, realizado através de consulta a dados contidos em catálogos, publicações especializadas e *websites* dos fabricantes. Duas câmeras de vídeo também foram utilizadas durante as coletas de dados, a fim de auxiliar na associação das informações obtidas em campo com os dados de pesagem contidos em relatórios emitidos pelas balanças.

No total, foram coletados dados de 6.253 caminhões, distribuídos em 22 configurações de eixos. A Tabela 3 lista a nomenclatura das principais configurações observadas e apresenta o tamanho das amostras. A análise dessa tabela indica que 59% dos veículos pesados observados nas rodovias paulistas de pista dupla são do tipo caminhão-plataforma (rígidos) e 41% são articulados. Dentre os articulados, o caminhão do tipo 2S3 é o mais freqüente (59,6%).

Apesar de existirem oito configurações na amostra de pesagem com freqüência considerada significativa, o CORSIM, dentro de suas limitações, permite ao usuário especificar no máximo quatro categorias de caminhões para serem utilizadas durante a simulação. Então, foi necessário adotar um critério de agrupamento das configurações observadas. À exemplo do trabalho desenvolvido por Cunha *et al.* (2005), o critério adotado foi a similaridade das distribuições acumuladas da relação peso/potência. A Tabela 4 apresenta o agrupamento das configurações em apenas quatro categorias, para fins de simulação.

**Tabela 3:** Configurações de eixos observadas nas balanças

<i>Eixos</i>	<i>Configuração</i>	<i>Nomenclatura</i>	<i>Amostra</i>	<i>Frequência</i>
2		2C	1.881	30,08%
3		3C	1.809	28,93%
		2S1	39	0,62%
4		2S2	206	3,29%
5		2S3	1.527	24,42%
		2I3	71	1,14%
6		3S3	413	6,61%
7		3T4	243	3,89%
Outros		-	64	1,02%
<b>Total</b>			<b>6.253</b>	<b>100,00%</b>

**Tabela 4:** Agrupamento das configurações e seus respectivos valores de peso/potência

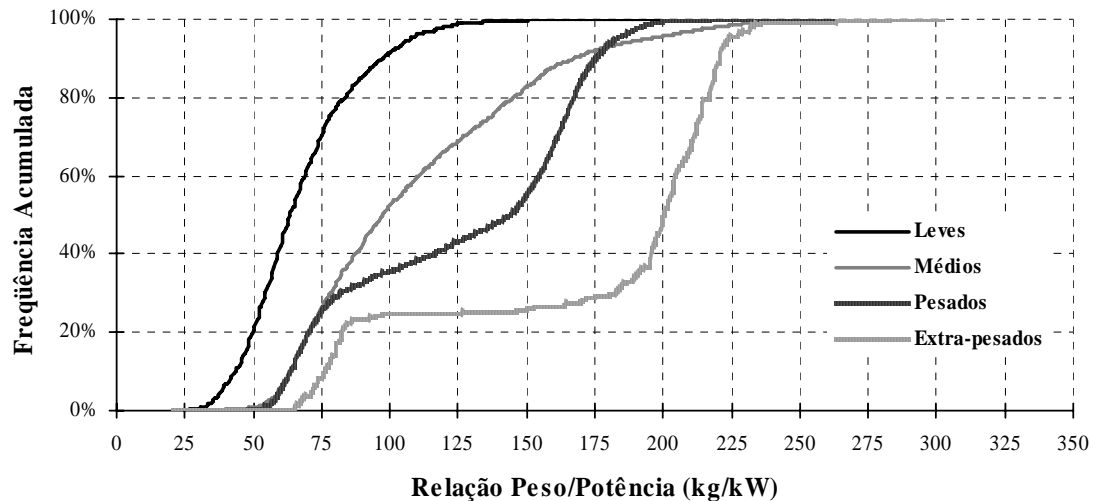
<i>Categoria</i>	<i>Eixos</i>	<i>Configurações</i>	<i>Veículo típico</i>	<i>Peso/potência (kg/kW)</i>	
				<i>Média</i>	<i>Mediana</i>
Leves	2	2C	Ford F-4000	67	64
Médios	3 e 4	3C, 2S1 e 2S2	Mercedes-Benz L1620	110	98
Pesados	5 e 6	2S3, 2I3 e 3S3	Scania 113H	126	144
Extra-pesados	7 +	3T4	Volvo FH12	173	200

A Figura 1 apresenta as distribuições acumuladas da relação peso/potência para as categorias agrupadas. Observa-se que cada uma das distribuições possui um perfil bem definido, principalmente aquelas das categorias de caminhões leves e extra-pesados. Apesar de as demais distribuições mostrarem perfis semelhantes até aproximadamente o 30º percentil, a partir desse ponto cada uma delas segue um perfil distinto, justificando a escolha de tais categorias.

De posse da configuração de eixos, marca e modelo do caminhão, foi feito um levantamento detalhado de suas características. Esse levantamento visou não somente o conhecimento da potência nominal dos veículos (como citado anteriormente), como também o conhecimento de todas as distâncias entre eixos existentes. A obtenção das distâncias entre eixos é considerada fundamental para a realização do estudo de caso proposto nesta pesquisa.

A tarefa de obter a distância entre eixos dos 22 tipos de configurações observadas nas balanças consistiu em um trabalho minucioso, visto que existe uma grande variedade nos padrões estabelecidos por cada fabricante e mesmo entre modelos de um mesmo fabricante. Outro fator importante é que os veículos articulados podem utilizar carrocerias de uma grande variedade de fabricantes e com diferentes finalidades, cada um adotando um padrão diferente de distân-

cias entre eixos. Dentre os principais fabricantes de carrocerias pesquisados, aquele que apresentou dados mais completos das características técnicas de seus produtos foi a Randon S/A. Dessa forma, esta pesquisa considerou que toda a amostra de veículos articulados utilizava carrocerias desse fabricante. É importante destacar que as imagens gravadas nas balanças foram usadas para que pudessem ser feitas considerações sobre o tipo de carga transportada por cada veículo e, assim, associar o modelo da carroceria que mais se aproximasse da realidade. O banco de dados é então composto pela configuração, marca/modelo, distância entre eixos e peso por eixos de todos os 6.253 veículos pesados observados nas balanças.



**Figura 1:** Distribuição acumulada da relação peso/potência (categorias agrupadas)

## 7. CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO CORSIM

Todo simulador possui parâmetros de calibração que podem ser ajustados pelos usuários e que contém inicialmente valores *default* sugeridos pelos seus desenvolvedores. Entretanto, somente em raras circunstâncias esses modelos são capazes de produzir bons resultados para um caso específico usando os valores *default*. O usuário deve sempre realizar uma calibração para assegurar que o modelo codificado reproduz com fidelidade as condições de tráfego locais e o comportamento dos motoristas.

A validação é uma etapa pós-calibração que tem como objetivo verificar a validade dos valores dos parâmetros encontrados na fase de calibração. A validação consiste no processo de determinar se o modelo pode representar de forma acurada as medidas de campo para diferentes cenários. Para isso, ela deve usar um conjunto de dados diferente daquele utilizado para a calibração do modelo (Zhang e Owen, 2004).

Devido ao grande número de parâmetros a ser ajustado nos simuladores de tráfego, o processo de calibração pode tornar-se bastante complexo. Por isso, técnicas de otimização vêm sendo empregadas visando a minimização desse esforço. Dentre elas, pode-se citar os algoritmos genéticos, que realizam a calibração de vários parâmetros simultaneamente para diminuir a discrepância entre o sistema real e o modelo simulado. O uso de um algoritmo genético requer a codificação dos parâmetros de calibração. Apesar de existirem vários esquemas de representação possíveis, a codificação dos genes dos cromossomos na forma binária (*bits*) ainda é a pre-

ferida pela maioria dos pesquisadores, uma vez que ela apresenta uma representação do problema de forma mais simplificada. Um programa computacional baseado em um algoritmo genético foi desenvolvido para calibrar o CORSIM no trecho de rodovia de pista dupla estudado. O programa foi desenvolvido na linguagem Perl.

No CORSIM, foram identificados vários parâmetros de entrada que podem ser modificados para melhor reproduzir as condições de tráfego locais. A fim de evitar um gasto desnecessário de tempo na calibração de parâmetros que produzem pequeno impacto nos resultados da simulação, é mais conveniente que se faça ajuste apenas nos parâmetros mais significativos. Além disso, em um algoritmo genético o tamanho da sequência binária é proporcional ao número de parâmetros codificados em cada cromossomo e, quanto maiores as sequências binárias, maiores são as necessidades computacionais. Portanto, apenas os parâmetros mais significativos devem ser usados, com o intuito de permitir que a calibração seja alcançada dentro do mínimo de gerações possível. Através de uma análise de sensibilidade, foram determinados que os parâmetros de calibração utilizados neste trabalho seriam os apresentados na Tabela 5.

**Tabela 5:** Parâmetros selecionados para a calibração do CORSIM

<i>Parâmetro</i>	<i>Descrição</i>
$P_1 - P_{10}$	Fator de sensibilidade para o <i>car-following</i> (motoristas do tipo 1 ao 10)
$P_{11}$	Constante de Pitt para o <i>car-following</i>
$P_{12}$	Tempo de reação para acelerar
$P_{13}$	Tempo de reação para desacelerar
$P_{14}$	Tempo para completar uma mudança de faixa
$P_{15}$	Tempo mínimo para geração de veículos
$P_{16}$	Aceitação de <i>gap</i> para mudança de faixa obrigatória
$P_{17}$	% de motoristas que cedem o direito de passagem para veículos mudando de faixa
$P_{18}$	Multiplicador para o desejo de realizar uma mudança de faixa arbitrária
$P_{19}$	Desaceleração máxima do veículo líder percebida pelo seu seguidor

Para executar uma calibração fazendo uso de um algoritmo genético, devem ser especificados o número de cromossomos, o número máximo de gerações e as probabilidades de cruzamento e de mutação. O tempo de processamento pode restringir a utilização de combinações grandes de número de cromossomos versus número máximo de gerações. Portanto, vários testes foram realizados com o objetivo de obter uma combinação que fornecesse uma boa convergência do MAER. A combinação escolhida para a calibração foi a de 100 cromossomos e 200 gerações.

As probabilidades de cruzamento ( $P_c$ ) e de mutação ( $P_m$ ) adotadas foram de 50% e 20%, respectivamente. Esses valores foram determinados a partir de uma análise de sensibilidade, que testou diversas combinações em que  $P_c$  e  $P_m$  variavam de 10% a 50%, com incrementos de 10%. Esses intervalos de variação foram fundamentados nos experimentos realizados por Kim e Rilett (2001). A função *fitness* utilizada nesta pesquisa é a apresentada na Equação 1, sendo as constantes dela as mesmas adotadas por Egami *et al.* (2004) e Schultz e Rilett (2005):

$$F = 100 e^{(-5 \text{ MAER})} \quad (1)$$

em que:  $F$ : *fitness*; e  
 $\text{MAER}$ : erro médio absoluto percentual (*Mean Absolut Error Ratio*).

Na calibração, o MAER foi calculado em função das duas medidas de desempenho escolhidas (fluxo e velocidade média) em seis pontos de controle ao longo da rede de tráfego, três em ca-



da sentido. Os dados utilizados na calibração foram os observados na primeira e segunda coleta de dados (realizadas nos dias 6 e 13/6/2005), perfazendo um total de cinco horas.

O MAER calculado antes da calibração do simulador, ou seja, com os parâmetros *default* do CORSIM é de 9,11% e, após as 200 gerações, esse valor foi reduzido para 6,32%. O valor do *fitness* calculado com os parâmetros *default* do CORSIM é 63,41. Ao final da calibração, esse valor chegou a 72,89, sendo que o valor máximo é 100. Esses valores indicam que a calibração reduziu o MAER em 2,79%, o que representa uma redução relativa do erro médio de aproximadamente 30%. Paralelamente, o *fitness* aumentou em 9,48.

A validação foi realizada usando um conjunto de dados diferente daquele utilizado na calibração do CORSIM. A adoção do critério utilizado para separar os dados para calibração e validação de um modelo é arbitrária. O conjunto de dados usado na validação foi o observado na terceira coleta de dados, que compreendeu três horas e foi realizada em 1/7/2005. Estes dados apresentaram características operacionais diferentes dos observados nas outras coletas, com fluxos de tráfego superiores. Nessa coleta de dados, foi adicionado um posto de controle em cada sentido de tráfego, ou seja, o total de postos de controle passou a ser oito.

A validação envolve a aplicação do modelo de simulação com o uso dos parâmetros encontrados na fase de calibração. Ela serve para verificar se os resultados da representação de diferentes condições de tráfego são confiáveis. Na validação, executa-se uma simulação empregando a mesma sequência de número aleatórios utilizadas na calibração. A importância de simular com a mesma sequência reside no fato de que se deseja reproduzir as mesmas condições de tráfego encontradas na calibração, já que a sequência de números aleatórios está relacionada aos processos estocásticos de tomada de decisão envolvidos na simulação.

O MAER foi calculado na validação com as mesmas medidas de desempenho da calibração. O valor calculado para a validação foi de 6,58%, ligeiramente superior ao valor obtido na calibração (6,32%), apesar da inclusão de mais dois postos de controle. Esse resultado comprova que os parâmetros calibrados são válidos para uso em um conjunto de dados com características diferentes. A diferença entre o MAER da validação e da calibração é julgada inexpressiva.

## **8. ESTUDO DE CASO**

Uma vez obtida uma versão calibrada do CORSIM, capaz de reproduzir as condições de tráfego observadas em campo, procedeu-se a um estudo de caso em que se buscou estabelecer o efeito do tráfego dos veículos pesados sobre uma ponte. O propósito foi demonstrar como os dados sobre o carregamento móvel obtidos a partir da simulação microscópica de uma rede de tráfego podem ser usados em seu dimensionamento. No estudo de caso, foram considerados dois cenários de tráfego e o efeito analisado foi o momento fletor máximo positivo ocasionado pela presença simultânea de veículos pesados, a fim de fazer uma comparação com aquele provocado pelo veículo-tipo e a carga uniformemente distribuída estabelecidos na NBR-7188. Essa ponte é hipotética e está localizada em um dos tramos da rede simulada.

A escolha dos cenários simulados no estudo de caso deu-se em função da vida útil de projeto das pontes, que, em geral, é de 50 anos para pontes de concreto. Eles foram definidos com o intuito de demonstrar a metodologia proposta nesta pesquisa e não têm a pretensão de prever as alterações das características da corrente de tráfego ao longo do tempo. Os cenários foram assim estabelecidos: 1) crescimento do fluxo de tráfego atual a uma taxa de 2% ao ano para

um período de 50 anos, mantendo a composição do tráfego obtida nas coletas de dados (27% de caminhões); e 2) crescimento do fluxo de tráfego atual a uma taxa de 2% ao ano para um período de 50 anos, modificando a composição do tráfego para contemplar uma participação de 50% da frota de veículos pesados. O cálculo do crescimento do tráfego foi feito admitindo uma progressão geométrica e o fluxo diário de tráfego atual foi definido como o observado no dia da segunda coleta de dados, obtido através de sensores automáticos instalados no pavimento pela concessionária que administra o trecho.

O tramo escolhido para representar a ponte está localizado no sentido Norte da rede e o único aspecto considerado na sua escolha foi a sua posição em relação ao ponto de início da rede, pois um tramo localizado muito próximo da entrada da rede sofreria uma grande influência do processo de geração de veículos do simulador de tráfego e pouca influência do *car-following* e da mudança de faixa, o que não seria desejável. Dessa forma, o tramo escolhido está situado a uma distância aproximada de 2 km do início da rede e possui extensão de 100 m. Neste trabalho, considera-se que a ponte é simplesmente apoiada, apesar de, na prática, vãos maiores que 50 m dificilmente serem empregados em pontes com esse sistema estrutural.

Diante da necessidade de obter dados microscópicos da simulação, verificou-se que o arquivo padrão de saída do CORSIM não poderia ser utilizado, já que ele contém apenas relatórios globais e esse tipo de informação não atende aos propósitos desta pesquisa. Nesse caso, a fim de obter dados individuais de cada veículo simulado, foi usado um outro arquivo de saída, o TSD, que é um arquivo de resultados binário gerado pelo CORSIM em que são escritas a cada segundo de simulação diversas informações sobre cada um dos veículos. Para ler o arquivo TSD, foi desenvolvida uma macro escrita na linguagem VBA.

Em síntese, a macro busca em um determinado tramo da rede os segundos em que ocorrem a presença dos veículos do tipo 3 a 6 (que representam os caminhões no CORSIM). Aqui, o tramo de interesse é o que representa a ponte. Para os instantes em que se verifica a existência de caminhões no tramo, são extraídos os números de identificação dos veículos (ID), os tipos de veículos (3, 4, 5 e 6), as faixas de tráfego em que eles se encontram naquele instante (faixa 1 ou 2) e suas posições nessas faixas. Apesar da possibilidade de existência de automóveis ou ônibus juntamente com os caminhões, eles não são levados em conta neste trabalho porque não chegam a produzir solicitações suficientes para causar danos às pontes (Loriggio, 1993).

A macro associa o tipo de veículo extraído do CORSIM ao banco de dados obtido das pesagens nas balanças. Essa associação é feita através de análises probabilísticas com a geração de números aleatórios. Nelas são definidas a configuração de eixos, a marca/modelo e os pesos por eixo de cada caminhão, com suas respectivas distâncias entre eixos.

Para a análise do efeito do tráfego dos caminhões sobre a ponte foi preciso obter a carga móvel determinada na norma brasileira e a gerada pelas simulações. Para isso, foi usado o FTO-OL, um programa que se destina à análise do comportamento estrutural de pórticos planos.

Segundo a NBR-7188, em pontes rodoviárias, a carga móvel é constituída por um veículo-tipo e por cargas  $q$  e  $q'$  uniformemente distribuídas. Enquanto a carga  $q$  procura levar em consideração a existência de outros veículos na ponte, a carga  $q'$  tenta reproduzir a ação de multidão (ABNT, 1984). Neste trabalho, considera-se que a ponte é da classe 45, o que implica que a carga  $q$  tem valor de  $5 \text{ kN/m}^2$ . Essa carga deve ser aplicada nas faixas de tráfego e nos acos-

tamentos, deduzindo-se apenas a área ocupada pelo veículo-tipo. A carga  $q'$ , que possui valor de  $3 \text{ kN/m}^2$  para todas as classes de ponte e é aplicada nos passeios, não foi considerada nesta pesquisa. A razão para tal reside no fato de que o efeito provocado por ela seria o mesmo para as situações de carregamento móvel da norma e carregamento móvel das simulações.

O tabuleiro considerado para a ponte foi de 8,20 m, ou seja, duas faixas de tráfego com 3,60 m cada e um acostamento com 1 m. A largura do tabuleiro é levada em conta no cálculo da carga  $q$ . Para a ponte simplesmente apoiada, o veículo-tipo, com suas três cargas concentradas de 150 kN cada uma, é posicionado no meio do vão. Essa localização representa o caso mais crítico para o cálculo do momento fletor. O peso total do trem-tipo para esse vão é de 4.460 kN e o momento fletor máximo provocado tem valor de 6.009 kN.m.

O carregamento móvel gerado pelos veículos simulados corresponde às cargas por eixo dos caminhões e suas localizações na ponte, obtidas com o uso da macro. Nesse caso são considerados apenas os pesos dos eixos efetivamente sobre a ponte. Vale lembrar que uma vez que se obtém toda a distribuição de cargas sobre a ponte, que poderia ser chamada de um trem-tipo representativo, não é necessária a consideração da carga  $q$ , já que ela é admitida na norma para reproduzir as solicitações provocadas por outros veículos na ponte além do veículo-tipo.

Devido à alta frequência das probabilidades de ocorrência de algumas quantidades de caminhões sobre a ponte, optou-se por fazer a análise do efeito provocado pela presença de múltiplos caminhões apenas para os três maiores carregamentos totais das três maiores quantidades verificadas para cada cenário simulado. Entende-se que, de forma geral, os maiores carregamentos levam à análise dos casos mais críticos. No Cenário 1, foi observado um máximo de 10 caminhões simultaneamente sobre a ponte. No Cenário 2, esse valor chegou a 12.

Os dados obtidos indicam que o carregamento máximo foi verificado no Cenário 2 com a presença simultânea de 10 caminhões sobre a ponte. O valor desse carregamento é de 2.843 kN, que representa 63,74% do peso do trem-tipo normativo. O momento mais crítico foi ocasionado por esse mesmo carregamento. Seu valor é 4.082 kN.m, correspondente a 67,93% do causado pelo trem-tipo normativo.

Um dado interessante é que o menor momento obtido é ocasionado pela presença de 12 caminhões no Cenário 2. Esse resultado indica que o número de caminhões na ponte, que a princípio pode ser visto como um fator crítico, não é predominante no cálculo do momento fletor. A razão para isso decorre do fato de que quanto maior o número de caminhões, menores e mais leves eles tendem a ser, implicando em menos eixos e carregamentos totais menores.

## 9. CONCLUSÕES

A calibração do CORSIM fez com que o erro médio do simulador fosse reduzido de 9,11% para 6,32%. Essa redução relativa de aproximadamente 30% é considerada significativa e demonstra a eficiência do uso de um algoritmo genético para a calibração de um modelo de simulação. O processo de validação comprovou que os parâmetros obtidos na calibração poderiam ser usados para outro conjunto de dados com características distintas.

O método de obtenção de um carregamento móvel através de um simulador de tráfego se mostra viável e adequado, uma vez que incorpora um modelo de *car-following* para representar o posicionamento dos veículos sobre as pontes. Apesar da necessidade de agregar veículos com

características similares para fins de simulação (devido a uma limitação do CORSIM), a análise probabilística a partir da geração de números aleatórios torna possível a desagregação dos dados de uma maneira que não compromete os resultados obtidos.

Apesar de o estudo de caso ter sido realizado para a análise estrutural de uma ponte, o método de obtenção do carregamento móvel desenvolvido nesta tese pode ser adaptado para aplicação no dimensionamento de pavimento, outro componente da infra-estrutura rodoviária. É importante ressaltar também que, embora tenha sido feita a análise de um único vão em um sistema estrutural específico, a metodologia desenvolvida pode ser aplicada para vãos de quaisquer magnitude e sistema estrutural.

#### **Agradecimentos**

Os autores agradecem o apoio financeiro para o desenvolvimento desta pesquisa fornecido pela CAPES e pelo CNPq.

#### **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- ABNT (1984). NBR 7188 – Carga Móvel em Ponte Rodoviária e Passarela de Pedestres. Rio de Janeiro.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (2006). Boletim estatístico da CNT. Disponível em: <<http://www.cnt.org.br>>. Acesso em: 30 dez. 2006.
- CRESPO-MINGUILLÓN, C.; CASAS, J. R. (1997). A comprehensive traffic load model for bridge safety checking. *Structural Safety*, v.19, n.4, p.339-359.
- CUNHA, A. L. B. N.; MON-MA, M. L.; ARAÚJO, J. J.; EGAMI, C. Y.; SETTI, J. R. A. (2005). Caracterização da frota de caminhões no sistema Anhanguera-Bandeirantes. In: XIX CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 2005, Recife. Anais... 1 CD-ROM.
- DNIT (2006). Manual de estudos de tráfego. Versão preliminar. Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes, Ministério dos Transportes, Brasil.
- EGAMI, C. Y.; SETTI, J. R. A.; RILETT, L. R. (2004). Algoritmo genético para calibração automática de um simulador de tráfego em rodovias de pista simples. *Transportes*, Rio de Janeiro, v.12, n.2, p.5-14.
- GHOSN, M.; MOSES, F. (1985). Markov renewal model for maximum bridge loading. *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, v.111, n.9, p.1093-1104.
- KIM, K.; RILETT, L. R. (2001). Genetic-algorithm-based approach for calibrating microscopic simulation models. In: IEEE INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS CONFERENCE, 2001, Oakland. Proceedings... 1 CD-ROM.
- LORIGGIO, D. D. (1993). Contribuições para a normalização da fadiga na revisão da norma NB1/93. III Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto, Universidade de São Paulo, São Paulo, p. 293-322.
- LUCHI, L. A. R. (2006). Reavaliação do trem-tipo à luz das cargas reais nas rodovias brasileiras. 257p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.
- NOWAK, A. S.; HONG, Y. K. (1991). Bridge live-load models. *Journal of Structural Engineering*, v.117, n.9, p.2757-2767, set.
- SCHULTZ, G. G.; RILETT, L. R. (2005). Calibration of distributions of commercial motor vehicles in CORSIM. *Journal of the Transportation Research Board* 1934, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, p.246-255.
- ZHANG, Y.; OWEN, L. E. (2004). Systematic validation of a microscopic traffic simulation program. In: 83rd ANNUAL MEETING OF THE TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, 2004, Washington. Proceedings... 1 CD-ROM.