

**XII CONGRESSO NACIONAL DE PESQUISA  
E ENSINO EM TRANSPORTES**

**ANAIIS  
ARTIGOS  
CIENTÍFICOS**

**Volume I**

**Fortaleza, 23 a 27 de novembro de 1998**

## SUMÁRIO

### ARTIGOS CIENTÍFICOS

#### **Aplicação de SIG em Transportes**

- Acessibilidade e Evolução Urbana em Cidades Médias Brasileiras..... 3**  
Renato da Silva Lima  
Antônio Nélson Rodrigues da Silva  
Raphael Wambier Fagundes

#### **Engenharia e Segurança de Tráfego I**

- Desempenho de Caminhões em Rampas Ascendentes ..... 17**  
Sergio Henrique Demarchi  
José Reynaldo A. Setti

- Determinação Empírica do Fluxo de Saturação e Diagnóstico de Congestionamentos do Tráfego Urbano ..... 29**  
Prof. David José A. V. de Magalhães, M.Sc., Mailla Virgínia de Faria Soares e Lourdiane Gontijo das Mercês  
José Maurício Pinto Junior, Guilherme Willer Santos e Campos, Sílvio José da Costa e Carlo Eugênio Lopes Magnani

#### **Gestão e Administração de Sistemas de Transporte I**

- Concentração de Empresas e Características Gerenciais no Sistema de Transporte por ônibus em Belo Horizonte ..... 41**  
Moema Miranda de Sigueira  
Vera cançado

- A Segmentação do Mercado de Transporte Urbanos de Passageiros: O Caso de Taguatinga (Distrito Federal) ..... 53**  
Ellen regina C. Martins  
Joaquim J. G. de Aragão  
Édina Shisue Miazaki

- Mudanças no Foco Gerencial das Empresas de Transporte..... 64**  
Leivis Malavé Cedenô  
Milena Bodmer

*Código 081: 3.12.00.00-5*

## DESEMPENHO DE CAMINHÕES EM RAMPAS ASCENDENTES

Sergio Henrique Demarchi

José Reynaldo A. Setti

Universidade de São Paulo

Escola de Engenharia de São Carlos

Departamento de Transportes

13560-970 – São Carlos, SP, Brasil

D 372 d

### RESUMO

Investiga-se o desempenho de caminhões em rampas, com base na redução de velocidade em função da distância percorrida num acente. Curvas de desempenho, que expressam a variação da velocidade em função da distância percorrida foram elaboradas para os caminhões típicos observados nas rodovias do estado de São Paulo, utilizando um modelo simplificado de cálculo de velocidades e distâncias, implementado no software Matlab. Os pesos dos caminhões foram obtidos em balanças situadas em rodovias paulistas e os demais parâmetros do modelo foram obtidos de catálogos de fabricantes. Os resultados mostram que os caminhões de 3 e de 5 eixos são os que apresentam maior redução de velocidades em greides. A relação potência/peso da maioria dos caminhões analisados é inferior a 10 hp/t, e as velocidades de equilíbrio para greides acima de 6% são iguais ou inferiores a 30 km/h. Verifica-se, baseado nas curvas de desempenho, que alguns caminhões não são capazes de respeitar a velocidade mínima estabelecida no Código Nacional de Trânsito. Embora o trabalho seja de natureza preliminar, foram obtidos resultados que podem futuramente ser utilizados no projeto de implantação de faixas adicionais para veículos lentos e na análise da capacidade e nível de serviço de rodovias.

### ABSTRACT

This paper investigates truck performance on grades, based on the speed reduction imposed to these vehicles as a function of distance. Performance curves were developed for trucks typically found on São Paulo highways, using a model to calculate speeds and distances which was implemented using Matlab. Truck weight data were obtained from weighstations and the remaining parameters were obtained from truck manufacturers. Results show that 3 and 5-axle trucks are those presenting the greatest speed reduction on grades. The power-to-weight ratio for most trucks is below 10 hp/t, and equilibrium speeds on 6% grades are equal to or below 30 km/h. It was verified as well that some trucks may be disrespecting the Brazilian Transit Code legislation regarding the minimum speed on highways. Even though the paper is exploratory in nature, the results may be used to help the development on the climbing-lanes design criteria and on highway capacity and level of service analysis.

### 1. INTRODUÇÃO

A grande dependência da economia brasileira pelo transporte rodoviário de carga gera um grande volume de tráfego de caminhões nas rodovias do país. A frota de caminhões é bastante diversificada, incluindo desde veículos leves destinados ao transporte de carga fracionada, até caminhões articulados extrapesados, destinados ao transporte de cana ou madeira. A maioria desses veículos têm um desempenho inferior ao dos automóveis, especialmente em rodovias em regiões de relevo ondulado, devido à sua baixa relação potência/peso.

O impacto dos caminhões nas rodovias é facilmente observável em aclives: em rodovias de pistas simples, é comum haver um acúmulo de veículos atrás de um caminhão quando não existem oportunidades de ultrapassagem. Em rodovias de pista dupla com razoável fluxo de tráfego, freqüentemente caminhões ocupam a faixa da esquerda durante a ultrapassagem de caminhões mais lentos, bloqueando veículos mais rápidos que são forçados a reduzir a velocidade e causando a formação de pelotões.

Em ambos os casos mencionados, existe a possibilidade de que alguns caminhões estejam infringindo o Código Nacional de Trânsito (CNT), que estabelece em seu artigo 62 que a velocidade mínima nas rodovias deve ser a metade do limite de velocidade máxima. Além desse aspecto legal, existem os relacionados ao projeto da rodovia, tanto no que diz respeito às rampas (comprimento e declividade) quanto às faixas adicionais. Com relação ao projeto

1020659  
119599

Engenharia e Segurança de Tráfego I

das rampas, conhecendo-se o desempenho dos caminhões pode-se projetar uma rodovia na qual as combinações entre o comprimento e a declividade das rampas sejam tais que os caminhões possam trafegar sem infringir o disposto no CNT. Com relação às faixas adicionais de subida, dispondo de informações sobre o desempenho dos caminhões, pode-se determinar tanto a necessidade de construção de faixas adicionais como o comprimento mais adequado para atenuar o impacto dos caminhões no fluxo normal de tráfego.

Dessa forma, o objetivo deste trabalho é investigar o desempenho de caminhões típicos brasileiros em aclives e desenvolver curvas de velocidade x distância para caminhões típicos das rodovias do estado de São Paulo. Os dados referentes aos pesos e modelos dos caminhões foram obtidos em postos de pesagem localizados em rodovias paulistas. Outros parâmetros dos caminhões, tais como potência do motor, reduções no câmbio e diferencial, etc. foram obtidos de catálogos de fabricantes. Esses dados foram utilizados na calibração de um modelo de desempenho, baseado em equações de movimento, que permite o cálculo de velocidades e distâncias utilizadas na elaboração das curvas. A partir do modelo calibrado, estudou-se a redução de velocidade e distâncias percorridas em função da inclinação da rampa e da velocidade inicial do caminhão.

## 2. DESEMPENHOS DE CAMINHÕES EM ACLIVES

O desempenho de caminhões em greides de diferentes comprimentos e inclinações é um fator de grande importância no projeto geométrico e análise da capacidade e nível de serviço de rodovias, sejam elas de pista simples ou dupla. Tal aspecto vem sendo investigado desde a década de 40, nos Estados Unidos, visando inicialmente avaliar a necessidade de implantação de faixas exclusivas para tráfego de veículos lentos em trechos onde caminhões apresentassem redução significativa em suas velocidades.

Os primeiros estudos de desempenho foram realizados pelo Bureau of Public Roads, no Estados Unidos, visando determinar velocidades de equilíbrio em rampas [Saal, 1941] e o efeito do comprimento, da declividade e do peso dos veículos na velocidade dos caminhões em rampas [Taragin, 1945].

Dada a ênfase em se verificar a redução de velocidade dos caminhões em função do comprimento das rampas, é prática comum desde os primeiros trabalhos que o desempenho de caminhões seja representado graficamente através de curvas que expressam a variação da velocidade em função da distância percorrida e da declividade da rampa.

A geração dessas curvas envolve o uso de métodos empíricos ou analíticos, validados em alguns casos através de testes de campo. Os métodos empíricos consistem na elaboração de curvas com dados obtidos pela simples monitorização de velocidades e distâncias percorridas por veículos em rampas de diferentes inclinações [Willey, 1949]. Os métodos analíticos (Taragin [1945]; Huff e Scrivner [1955]; Firey e Peterson [1962]) fazem uso de modelos baseados na segunda lei de Newton, com variações principalmente na forma de cálculo das resistências de rolamento e aerodinâmica. Alguns modelos consideram tais resistências variando em função da velocidade [Taragin, 1945; Huff e Scrivner, 1955] enquanto que outros não [Firey e Peterson, 1962]. Além disso, alguns modelos são mais detalhados, considerando as trocas de marcha do veículo [St. John e Kobett, 1978] enquanto outros admitem simplificações, tais como o uso de potência ou torque constantes. Estes últimos, denominados modelos simplificados, consistem a maioria dos modelos encontrados na literatura.

No Brasil, Silveira [1974] e o Instituto de Pesquisas Rodoviárias do DNER [DNER, 1979] obtiveram curvas de desempenho com o propósito de definir a necessidade implantação de faixas adicionais para caminhões em rodovias de pista simples. Kabbach Jr. [1992] elaborou

um critério para implantação de faixas adicionais, baseado nas curvas desenvolvidas pelo DNER. Outras aplicações das curvas de desempenho no país incluem a determinação de velocidades médias em rampas e cálculo do equivalente veicular para caminhões em rodovias de pistas simples [Machado Neto, 1995; Setti e Machado Neto, 1998].

## 2.1. Relação Potência/Peso

De todos os fatores relacionados ao caminhão, o mais importante de todos é a relação entre a potência do motor e o peso total do caminhão. Isso pode ser verificado pela análise do modelo simplificado de cálculo da aceleração  $a$ , através da segunda lei de Newton:

$$a = \frac{F - R}{m} = \frac{F - R}{W} \quad \begin{matrix} \cup \\ \vee \end{matrix} \quad \therefore a = \frac{1}{V} \frac{P}{W} - \frac{R}{W} \quad (1)$$

$$F = \frac{P}{V} \quad \begin{matrix} \vee \\ \wedge \end{matrix}$$

em que  $F$ : força motriz;

$R$ : resistência ao movimento;

$V$ : velocidade do veículo;

$P$ : potência do motor, considerada constante;

$W$ : peso do caminhão; e

$m$ : massa do caminhão.

Pesquisas realizadas no Brasil demonstram que os caminhões brasileiros têm um desempenho inferior ao dos caminhões americanos, em função da sua menor relação potência/peso. Essas pesquisas foram realizadas como uma tentativa de adaptação da metodologia do HCM que possibilitasse sua aplicação às condições brasileiras. Silveira [1978], após levantamento dos veículos mais representativos da frota brasileira na época, desenvolveu curvas de desempenho para caminhões leves (9,0 hp/t), caminhões médios (7,5 hp/t) e caminhões pesados (4,0 hp/t). Pesquisa realizada pelo DNER [1979], também baseada em características da frota nacional, mostrou que a relação potência/peso média era em torno de 7,7 hp/t. Kabbach Jr. [1992] conduziu novas investigações sobre as características e composição da frota nacional, mas concluiu que a relação potência/peso utilizada pelo DNER [1979] ainda era válida para os veículos da época. Machado Neto [1995] determinou curvas de desempenho para um caminhões com uma relação potência/peso de 5,9 hp/t, recomendada na resolução 40-75 do Conselho de Desenvolvimento Industrial (CDI). Além disso, o autor determinou curvas para caminhões sobrecarregados supondo uma relação potência/peso de 3,9 hp/t. A adoção de ambos os valores mencionados não foi baseada, entretanto, nas características da frota existente na época, mas apenas em suposições sobre o carregamento dos veículos.

Em contrapartida, a 3<sup>a</sup> edição do HCM [TRB, 1985] fornece curvas de desempenho para três diferentes categorias de caminhões: leves (22,0 hp/t), médios (11,0 hp/t) e pesados (7,3 hp/t). A 4<sup>a</sup> edição do HCM [TRB, 1994] engloba essas três categorias em uma única categoria de caminhões e fornece somente curvas para o caminhão com 11,0 hp/t. Os menores valores adotados em estudos americanos ficam em torno de 5,3 e 7,0 hp/t [Safwat e Walton, 1986] para caminhões articulados extrapesados. O manual americano ainda considera valores diferentes de 11,0 hp/t no cálculo dos equivalentes veiculares. Em rodovias de pista dupla com separação física ("freeways") a relação potência/peso considerada é em torno de 14,7 a 17,6 hp/t e em rodovias de pista dupla sem separação física ("multilane highways") é de 13,2 hp/t. Segundo o manual, o uso de um valor menor na previsão do desempenho dos caminhões em rampa não é inconsistente com os valores utilizados no cálculo dos equivalentes veiculares, pois são considerados dessa forma caminhões de pior desempenho. Entretanto, tal

afirmação não parece ser baseada em resultados de pesquisas, mas somente no bom senso dos pesquisadores que elaboraram o manual.

## 2.2. Velocidade Mínima dos Veículos

A redução de velocidade, associada à definição de uma velocidade mínima de tráfego, é um dos critérios utilizados no projeto e implantação de faixas adicionais destinadas ao fluxo de veículos lentos e na análise de acidentes entre automóveis e caminhões, tais como colisões traseiras. Kabbach Jr. [1992] apresenta um resumo dos critérios utilizados na definição da redução máxima aceitável, comparando valores adotados pelos métodos AASHTO e HCM com o método do DNER [1979]. Os métodos americanos admitem uma redução de velocidade entre 16 e 24 km/h, enquanto que o método do DNER admite redução maior, ou seja, 35 km/h, sendo a velocidade mínima permitida de 45 km/h.

Pelo Código Nacional de Trânsito, a velocidade mínima permitida é a metade da máxima, respeitadas as condições operacionais de trânsito e da via, conforme estabelecido no artigo 62. Entretanto, o artigo 219 prevê que o artigo 62 não se aplica quando o veículo estiver trafegando na faixa da direita em uma via com pelo menos duas faixas de tráfego, mas sujeita à multa qualquer veículo trafegando na faixa da esquerda com velocidade menor que a mínima.

## 3. DETERMINAÇÃO DAS CURVAS DE DESEMPENHO

O desempenho de um veículo rodoviário é função da interação entre a força que impulsiona o veículo, fazendo-o mover, e a resultante das forças contrárias ao movimento, chamadas de resistências. De acordo com a segunda lei de Newton, a resultante dessas forças é igual ao produto da massa do veículo e sua aceleração. Portanto, o veículo acelera caso a resultante das forças que atuam sobre ele seja positiva e desacelera caso seja negativa. Quando essa resultante for nula, o veículo passa a trafegar com velocidade constante, denominada velocidade de equilíbrio. A Figura 1 mostra uma representação esquemática das equações utilizadas no modelo e a Tabela 1 apresenta uma descrição das variáveis e parâmetros utilizados no modelo.

O cálculo da aceleração do veículo utiliza algumas hipóteses simplificadoras:

- A potência do motor é constante, não variando com a rotação do motor;
- O veículo utiliza sempre a máxima potência do motor; e
- Não são consideradas trocas de marchas.

É evidente que o uso de um modelo simplificado pode gerar alguns erros. Por exemplo, o uso da potência nominal máxima do motor e não de uma potência variável com a rotação superestima o desempenho do veículo, já que, em regime normal, não se utiliza a potência máxima durante todo o tempo. Entretanto, o uso de uma potência que varia em função da rotação do motor requer o conhecimento de como trocas de marchas são feitas, o que é função de hábitos do motorista. O uso de um modelo mais sofisticado exigiria hipóteses adicionais a respeito de trocas de marchas e não seria mais confiável do que o modelo simplificado usado.

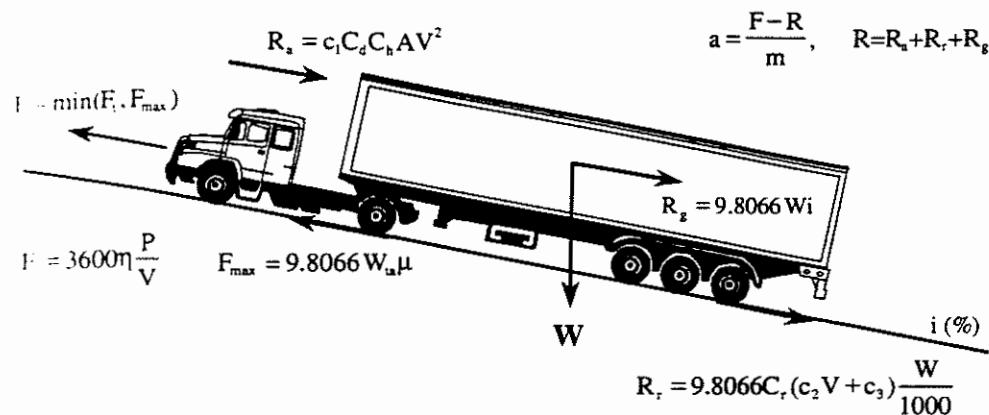


Figura 1: Diagrama de forças que atuam em um veículo em movimento numa rampa

Como mostrado na Figura , a aceleração  $a$  é uma função da velocidade instantânea do caminhão. O cálculo de velocidades e distâncias pode ser feito por dois métodos: no primeiro, a velocidade  $V$  e a distância percorrida  $S$  são obtidas por integração, respectivamente, da aceleração e da velocidade do veículo num dado instante  $t$ . No segundo, a distância  $S$  é obtida por integração da razão entre velocidade e aceleração. Neste estudo, os cálculos foram realizados através do segundo método, já que o propósito é obter velocidades e respectivas distâncias de forma a elaborar as curvas de desempenho. As integrações foram feitas numericamente, implementando-se o modelo proposto no software Matlab.

Tabela 1: Variáveis e parâmetros utilizados no modelo

Definição	Definição
$V$ velocidade (km/h)	$R$ resistência total (N)
$a$ aceleração ( $m/s^2$ )	$R_a$ resistência aerodinâmica (N)
$F$ força motriz (N)	$R_r$ resistência de rolamento (N)
$F_t$ força de tração (N)	$R_g$ resistência de rampa (N)
$F_{\max}$ força de tração máxima (N)	$c_1$ constante = 0,047285
$P$ potência do motor (kW)	$C_d$ coeficiente de arrasto
$\eta$ coeficiente de eficiência da transmissão	$C_h$ coeficiente de correção devido à altitude
$W$ peso do veículo (kg)	$H$ altitude (m)
$m$ massa do veículo (kg)	$A$ área frontal ( $m^2$ )
$W_{ta}$ peso do veículo atuante no eixo motriz (kg)	$c_2$ constante para tipo de pneu
$m$ coeficiente de atrito estático pneu-pavimento	$c_3$ constante para tipo de pneu
$i$ inclinação da rampa (%)	$C_r$ coeficiente de rolamento

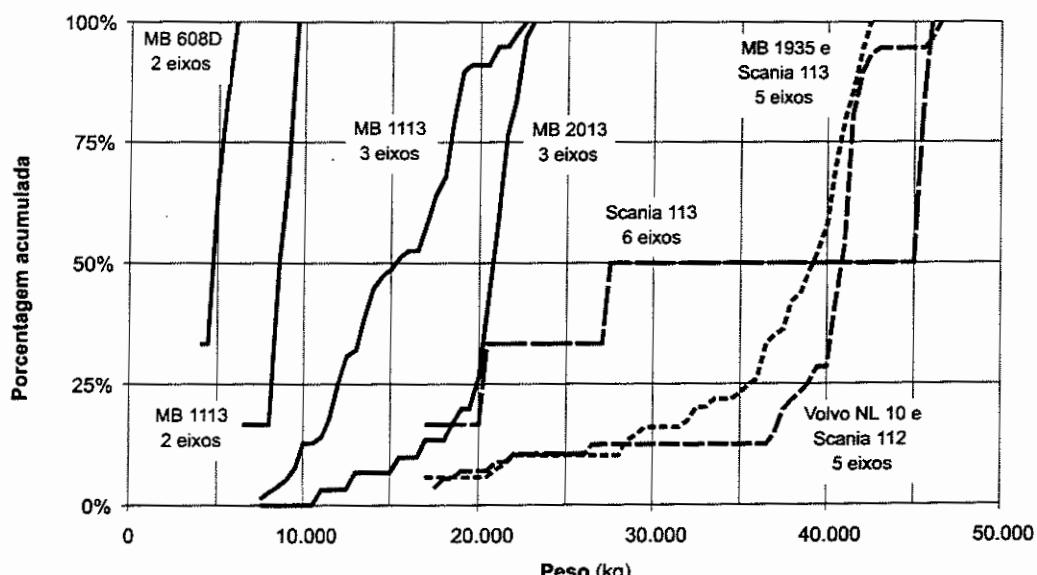
### 3.1. Distribuição de Pesos dos Caminhões

Os modelos de caminhões e seus respectivos pesos foram obtidos em pesagens efetuadas em balanças nas rodovias Anhanguera e Bandeirantes, no estado de São Paulo, em outubro de 1997. A amostra obtida compreende dados referentes a 534 caminhões, dos quais quase a metade (49%) é composta por caminhões de 3 eixos. A maior parte da frota (62%) é composta por caminhões dos modelos Mercedes Benz e Scania (22%). Maiores detalhes da caracterização da frota podem ser obtidos em Setti *et al.* [1998].

**Tabela 2:** Modelos representativos de cada categoria

<i>Eixos</i>	<i>Modelo</i>	<i>Amostra</i>	
2	MB 1113	6	2,4%
	MB 608D	6	2,4%
3	MB 1113	78	31,1%
	MB 2013	30	12,0%
5	MB 1935 e Scania 113	56	22,3%
	Volvo NL 10 e Scania 112	69	27,5%
6	Scania 113	6	2,4%
	Total analisado	251	100,0%

Os caminhões foram classificados em função do número de eixos. Essa classificação é mais simples e representa uma forma indireta de classificação dos caminhões por peso. Para a análise do desempenho, foram selecionados os veículos mais representativos de cada categoria, mostrados na Tabela 2. Os dados de alguns modelos de caminhões, como os de 5 eixos, foram agrupados, dada a semelhança de peso e potência nominal do motor.

**Figura 2:** Distribuições do peso bruto total dos caminhões utilizados na análise

A distribuição dos pesos dos caminhões selecionados para análise pode ser vista na Figura 2, que mostra que a variação no peso bruto total (PBT) é menor para caminhões de 2 e de 5 eixos. Em função da variabilidade observada no PBT, optou-se por determinar o desempenho em 4 diferentes condições de carregamento, e verificar a variação desse desempenho em cada caso. Os pesos escolhidos são aqueles correspondentes ao 25º, 50º, 75º e 100º percentis, que podem ser vistos na Figura 2.

### 3.2. Potência e outros parâmetros utilizados no modelo

As potências dos motores utilizadas no modelo foram obtidas de catálogos de fabricantes. As informações de alguns modelos já fora de linha, como o MB 1113, o MB 2013 e o MB 608D, foram obtidas do trabalho de Silveira [1974]. A potência utilizada no modelo é a nominal, conforme discutido anteriormente.

Outros parâmetros, tais como os coeficientes de arrasto ( $C_d$ ) e de rolamento ( $C_r = 1,2$ ), e área frontal ( $A$ ), foram obtidos do método J2188 da SAE [1996]. O valor do rendimento da transmissão ( $\eta = 0,85$ ) foi adotado de Silveira [1974]. Os parâmetros relacionados ao tipo de pneu ( $c_2 = 0,0255$  e  $c_3 = 4,1$ ) também foram os recomendados pela SAE. Supôs-se que os caminhões operem ao nível do mar ( $C_h = 1$ ). A Tabela 3 mostra os parâmetros que variam em função do veículo.

Tabela 3: Valores dos parâmetros utilizados

Eixos	Modelos	$C_d$	$A$ ( $m^2$ )	Potência (kW)
2	MB 1113	0,95	7,9	96
	MB 608D	0,95	8,9	63
3	MB 1113	0,95	7,9	96
	MB 2013	0,95	7,9	96
5	MB 1935 / Scania 113	0,78	10,0	266
	NL 10 / Scania 112	0,78	10,0	235
6	Scania 113	0,78	10,0	266

#### 4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

A Figura 3 mostra o desempenho dos caminhões MB 1113 e MB 2013, ambos de 3 eixos. São mostradas curvas de velocidade  $\times$  distância para greides de 2%, 4%, 6%, 8%. Para cada greide, existem 4 curvas, que representam caminhões com pesos correspondentes às freqüências acumuladas de 25%, 50%, 75% e 100% (a curva superior do grupo corresponde ao caminhão mais leve e a curva inferior corresponde ao caminhão mais pesado). A velocidade de entrada na rampa para todos os tipos de veículos é de 90 km/h.

A faixa de variação das velocidades de equilíbrio em função do peso do veículo é maior para o caminhão MB 1113 (10 a 20 km/h) do que para o MB 2013 (em torno de 5 km/h). A faixa de variação das velocidades para os caminhões de 2 e 5 eixos é da ordem de 10 km/h. A variação de velocidades de equilíbrio para o caminhão Scania 113 de 6 eixos é a maior de todos (30 km/h), mas as curvas que correspondem aos pesos de 50%, 75% e 100% da freqüência acumulada, concentram-se em uma faixa de variação de apenas 1 km/h. Isso ocorreu em função do pequeno tamanho da amostra utilizada (6 veículos).

Como o intervalo de variação das velocidades é relativamente pequeno na maioria dos casos, as análises subsequentes foram realizadas somente para caminhões com pesos correspondentes a 75% da freqüência acumulada ( $W_{75\%}$ ).

A Figura 4 mostra as curvas de velocidade  $\times$  distância para todos os modelos de caminhões analisados, com pesos  $W_{75\%}$ . O pior desempenho é apresentado pelos caminhões de 3 eixos, que são os com maior redução de velocidade em uma menor distância de rampa percorrida. A velocidade desses caminhões converge assintoticamente para a velocidade de equilíbrio em torno de 1.300 m para um greide de 4%, 800 m para um greide de 6% e 600 m para um greide de 8%.

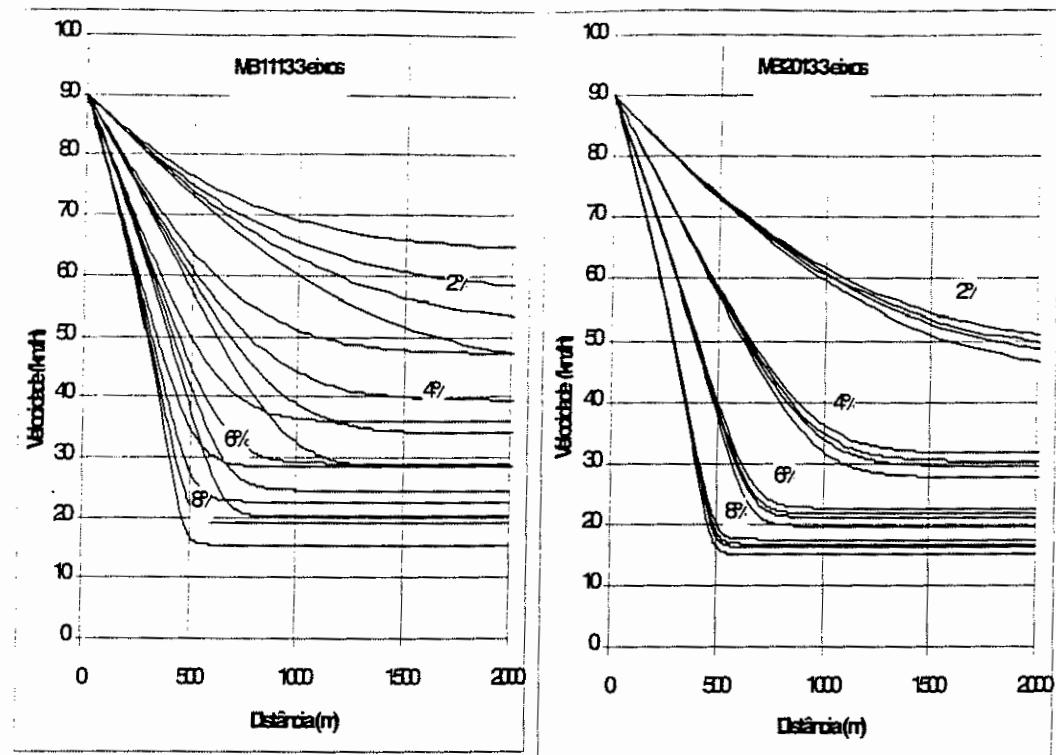


Figura 3: Curvas de desempenho para caminhões de 3 eixos

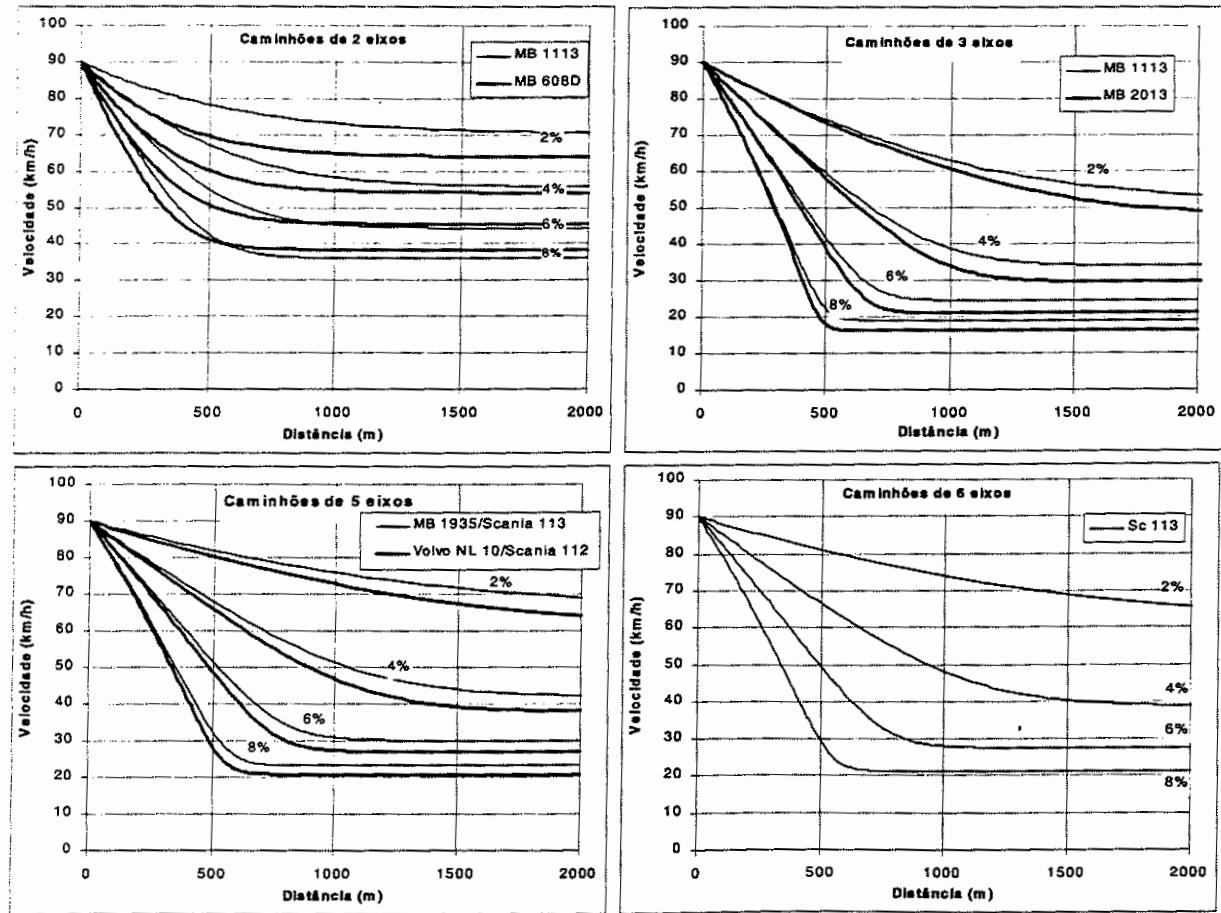


Figura 4: Curvas de desempenho dos caminhões com peso  $W_{75\%}$

O desempenho desses veículos pode ser ainda pior do que o previsto, considerando-se que os modelos MB 1113 e MB 2013 são caminhões antigos, cujo estado de manutenção pode reduzir a potência nominal do motor. Entretanto, a investigação desse aspecto estão além do propósito deste trabalho, dado que não foi possível coletar informações sobre o estado de conservação dos veículos.

A redução de velocidades obtida é um reflexo da relação potência/peso mostrada na Tabela 4. Todos os caminhões, com exceção dos de 2 eixos, tem relação potência/peso abaixo dos 10 hp/t. A média, ponderada pela participação de cada modelo de caminhão na amostra, é de 7,9 hp/t. Esse valor é muito próximo ao valor estimado pelo DNER [1979], sugerindo que, apesar dos novos modelos de caminhões que circulam pelas rodovias, a relação potência/peso continua quase que inalterada, pois ainda é grande participação na frota de caminhões de 3 eixos, cujo desempenho é notadamente inferior. Além disso, os caminhões de 5 e 6 eixos que, embora possuam melhor desempenho do que os de 3 eixos, têm uma relação potência/peso baixa em função do elevado peso total da composição, em torno de 41 toneladas.

Tabela 4: Relação potência/peso dos caminhões analisados

<i>Eixos</i>	<i>Modelo</i>	<i>Potência/Peso (hp/t)</i> <sup>*</sup>
2	MB 1113	14,1
	MB 608D	16,1
3	MB 1113	7,0
	MB 2013	6,0
5	MB 1935 / Scania 113	8,6
	NL 10 / Scania 112	7,7
6	Scania 113	7,9
	média ponderada	7,9

\* Peso utilizado corresponde ao 75º percentil ( $W_{75\%}$ )

Tabela 5: Velocidades de equilíbrio

<i>Modelo</i>	<i>Eixos</i>	<i>Velocidade de equilíbrio (km/h)</i>			
		2%	4%	6%	8%
MB 1113	2	70,3	55,7	44,3	36,0
MB 608D	2	63,9	54,1	45,5	38,4
MB 1113	3	51,5	33,9	24,5	19,0
MB 2013	3	46,5	29,5	21,1	16,3
MB 1935 / Scania 113	5	65,2	41,9	30,1	23,3
Volvo NL 10 / Scania 112	5	59,8	37,9	27,0	20,9
Scania 113	6	61,2	38,6	27,6	21,3

Admitindo-se que a velocidade inicial seja 90 km/h, a velocidade mínima, definida em função do artigo 62 do CNT, seria de 45 km/h. Observa-se então na Tabela 5 que as velocidades de equilíbrio para os caminhões de 3 eixos em greides de 4% já são menores que 45 km/h. Em greides de 6%, apenas caminhões de 2 eixos têm velocidade de equilíbrio maior que 45 km/h e, em greides de 8%, todas as velocidades de equilíbrio são menores que 45 km/h.

Baseando-se apenas na redução de velocidade no aclice, é possível definir os comprimentos de rampa máximos para que não haja a necessidade de implantação de faixas adicionais, respeitado o critério de velocidade mínima de 45 km/h. A Tabela 6 mostra os comprimentos máximos admissíveis para rampas de 2%, 4%, 6% e 8% que satisfazem essa condição. Pode-

se perceber que o veículo crítico é o MB 2013, em função da baixa relação potência/peso observada para esse modelo.

Tabela 6: Comprimento máximo de rampa

<i>Modelo</i>	<i>Eixos</i>	<i>Comprimento (m)<sup>a</sup></i>			
		2%	4%	6%	8%
MB 1113	2	— <sup>b</sup>	— <sup>b</sup>	1038,64	457,11
MB 608D	2	— <sup>b</sup>	— <sup>b</sup>	— <sup>b</sup>	403,88
MB 1113	3	— <sup>b</sup>	795,20	466,10	333,15
MB 2013	3	— <sup>b</sup>	721,99	443,91	322,33
MB 1935 / SC 113	5	— <sup>b</sup>	1374,79	593,88	392,65
Volvo NL 10 / Scania 112	5	— <sup>b</sup>	1071,95	545,57	371,96
Scania 113	6	— <sup>b</sup>	1128,14	558,08	377,66

<sup>a</sup> Máxima distância percorrida em que ocorre uma redução de velocidade de 90 km/h para 45 km/h

<sup>b</sup> A velocidade de equilíbrio é maior que 45 km/h

Entretanto, é importante levar em conta que nem todos os caminhões entram em uma rampa ascendente com velocidades de 90 km/h. Cabe ainda ressaltar que o valor de 90 km/h é, provavelmente, um valor bastante otimista na maioria das situações. Em algumas rodovias paulistas, localizadas em terrenos ondulados, a sequência de rampas faz com que nem sempre o caminhão consiga recuperar sua velocidade a ponto de iniciar o greide seguinte com a velocidade igual a 90 km/h. Se o veículo entra no acidente com uma velocidade menor, a distância percorrida até a velocidade de 45 km/h ser atingida é bem menor, como mostra a Figura 5, elaborada para um caminhão de 3 eixos, o modelo MB 2013.

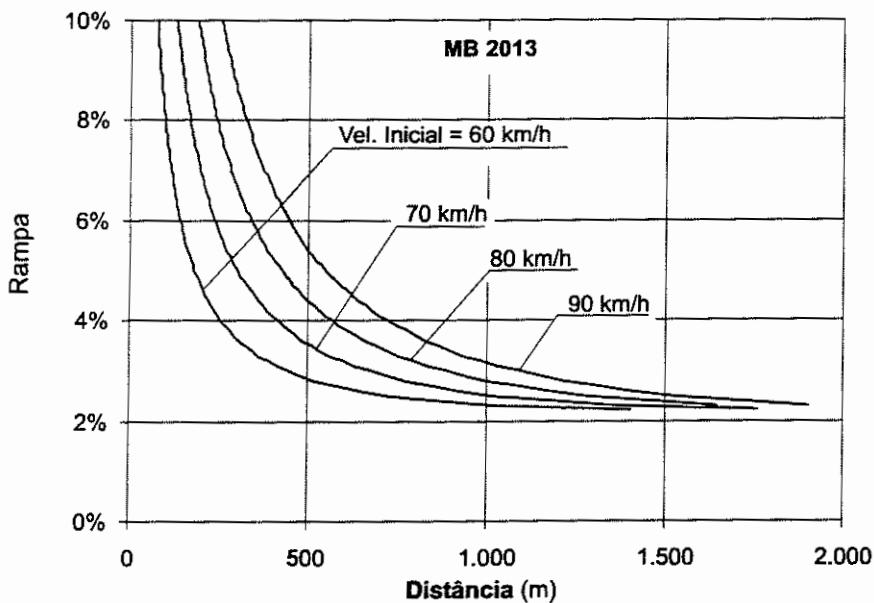


Figura 5: Distância para atingir a velocidade de 45 km/h, em função da velocidade inicial.

Se o caminhão entra em um greide de 4% com uma velocidade inicial de 90 km/h, a distância que ele percorre até reduzir sua velocidade para 45 km/h é de 722 m. Se a velocidade inicial do caminhão é de 60 km/h, a distância percorrida é de 255 m, ou seja, uma diferença de 467 m. Isso significa que a rampa deveria ser 467 m mais curta para que a velocidade do caminhão não fosse menor que 45 km/h, uma redução de 65% no comprimento máximo da rampa.

## 5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Deve-se ressaltar que os resultados obtidos são preliminares e que estudos adicionais devem ser conduzidos para que os valores obtidos sejam realmente representativos do desempenho dos caminhões que utilizam as rodovias nacionais. No entanto, estes mesmos resultados mostram alguns aspectos que podem subsidiar ações para tornar mais efetiva a utilização de caminhões nas rodovias brasileiras.

Os diagramas velocidade × distância obtidos podem ser usados no projeto geométrico de rodovias e na adaptação de métodos para determinação de fatores de equivalência. Na verdade, o estudo ora relatado faz parte de um projeto mais amplo que visa determinar os impactos de caminhões na capacidade e nível de serviço de rodovias de pista dupla.

Resultados como os mostrados na Tabela 6 podem servir de subsídio para a formulação de critérios para implantação de faixas adicionais de subida, e os modelos obtidos podem servir tanto para reavaliar os critérios existentes como para desenvolver novos critérios.

Um outro aspecto importante que o estudo mostra é que os caminhões de três eixos provocam um impacto muito maior que o esperado – os dois modelos com três eixos mais comuns nas rodovias estudadas apresentam o pior desempenho e, em consequência disso, os menores comprimentos de rampa máximos admissíveis, considerando-se o critério de redução de velocidade de 90 para 45 km/h. Esse pior desempenho reflete-se em maior tempo de viagem e em maiores atrasos impostos aos outros veículos que usam a mesma rodovia.

Para melhorar a aplicabilidade dos resultados de um estudo como o apresentado, seria desejável dispor de uma amostra maior, que também incluísse caminhões articulados do tipo treminhão e romeu-e-julieta, usados pela indústria canavieira. Pretende-se obter um conjunto de dados adicionais que permita a elaboração de curvas de desempenho para essas classes de caminhão.

Finalmente, deve-se ressaltar que os dados foram coletados em rodovias nas quais as estações de pesagem funcionam continuamente e, por conseguinte, existem poucos caminhões trafegando com excesso de carga. O ideal seria obter uma amostra de pesos brutos totais em diversas rodovias onde não existem balanças para que se tivesse um panorama real das distribuições de PBT. Infelizmente, os recursos disponíveis impossibilitam a aquisição de tais dados.

### Referências Bibliográficas

- DNER [1979]. *Instruções para a Implantação de Terceiras Faixas*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro, RJ. citado por Kabbach Jr., [1992].
- Firey, J. C.; Peterson; E. W. [1962]. "An Analysis of Speed Changes for Large Transport Trucks". *Highway Research Board Bulletin 334*, p. 1 – 26
- Huff, T. S.; Scrivner, F. H. [1955]. "Simplified Climbing-Lane Design Theory and Road-Test Results" *Highway Research Board Bulletin 104*, p. 1 - 11
- Kabbach Jr., F. I. [1992]. *Contribuição para o Estudo de Implantação de Faixas Adicionais em Rampas Ascendentes de Rodovias de Pistas Simples*. Tese (Doutorado), Escola Politécnica, USP. São Paulo, SP
- Machado Neto, E. F. [1995]. *Influência dos Veículos Pesados na Capacidade de Rodovias de Pistas Simples*. Dissertação (Mestrado), EESC, USP. São Carlos, SP.
- Machado Neto, E. F.; Setti, J. R. [1998]. "O Problema da Sobrecarga na Operação de Veículos Pesados em Rodovias no Brasil". In: Transporte em Transformação, cap. 5, p. 94–117. Confederação Nacional do Transporte/Makron Books do Brasil, São Paulo.
- Saal, C. C. [1941]. "Hill-climbing Ability of Motor Trucks". *Highway Research Board Proceedings*, v.21, p. 393 – 407. Citado por Taragin [1945]
- SAE Procedure J2188 [1996] "Commercial truck and bus SAE recommended procedure for vehicle performance prediction and charting". Society of Automotive Engineers, Warrendale, PA
- Safwat, K. N. A.; Walton, C. M. [1986]. "Expected Performance of Longer Combination Vehicles on Highway

- Grades". *Transportation Research Record* 1052, págs. 63-77.
- Setti, J. R.; Machado Neto, E. F. [1998]. "Estimation of Truck Equivalents for Up Grades on Two-Lane Rural Roads in Brazil". In: *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Symposium on Highway Capacity*, Danish Road Directorate/TRB, Copenhague, Dinamarca, p. 897-914, v. 2.
- Setti, J. R.; Leandro, R. F.; Pessôa, K. P. C. [1998]. Características operacionais de caminhões em rodovias paulistas. Relatório técnico (não publicado), STT-EESC-USP.
- Silveira, A. [1974]. *Considerações sobre a Influência dos Caminhões nos Gradios em Rampa na Capacidade das Rodovias*. Dissertação (Mestrado), EESC - USP. São Carlos, SP
- St. John, A. D.; Kobett, D. R. [1978] *Grade Effects on Traffic Flow Stability and Capacity*. NCHRP Report 185, Transportation Research Board
- Taragin, A. [1945]. "Effect of Length of Grade on Speed of Motor Vehicles". *Highway Research Board Proceedings*, v. 25, p. 342- 353
- TRB [1985]. *Highway Capacity Manual*. Special Report 209. National Research Council, Washington, D.C. 3<sup>a</sup> ed.
- TRB [1994]. *Highway Capacity Manual*. Special Report 209. National Research Council, Washington, D.C. 3<sup>a</sup> ed. revisada.
- Willey, W. E. [1949]. "Survey of Uphill Speeds of Trucks on Mountain Grades" *Highway Research Board Proceedings*, v. 29, p. 304- 310.

## AGRADECIMENTOS

No desenvolvimento deste estudo, os autores contaram com recursos da CAPES, do CNPq e do projeto RECOPE-Transportes, gerenciado pela FINEP. Os autores agradecem a colaboração da DERSA na obtenção dos dados dos caminhões, que foram coletados por Karina P. C. Pessôa, cujo auxílio também é agradecido.

---

### Endereços

Sergio Henrique Demarchi  
Aluno de doutorado, Depto. de Transportes  
Escola de Engenharia de São Carlos  
Universidade de São Paulo  
Av. Carlos Botelho, 1465  
13560 – São Carlos, SP, Brasil  
fone: (016) 273-9613 fax: (016) 273-9602  
E-mail: demarchi@linkway.com.br

Dr. José Reynaldo A. Setti  
Professor, Depto. de Transportes  
Escola de Engenharia de São Carlos  
Universidade de São Paulo  
Av. Carlos Botelho, 1465  
13560 – São Carlos, SP, Brasil  
fone: (016) 273-9596 fax: (016) 273-9602  
E-mail: setti@sc.usp.br