

PREVISÃO DA VELOCIDADES DE FLUXO LIVRE EM AUTOESTRADAS E RODOVIAS DE PISTA DUPLA PAULISTAS

Gustavo Riente de Andrade

Cira Souza Pitombo

André Luiz B. N. da Cunha

José Reynaldo Setti

Antonio Clóvis Pinto Ferraz

Universidade de São Paulo

Escola de Engenharia de São Carlos

RESUMO

A velocidade de fluxo livre (*FFS*) é definida pelo HCM como a velocidade média dos veículos trafegando em um segmento em condições de fluxo baixo, quando os motoristas têm a liberdade de escolha da velocidade desejada, e não há restrições devido ao tráfego ou dispositivos de controle à jusante. Neste artigo, foram usadas técnicas de Análise Multivariada (AM) de dados para investigar quais características da infraestrutura podem ter relação com a velocidade de fluxo livre dos automóveis em autoestradas e rodovias de pista dupla paulistas, com o objetivo de fundamentar a adaptação de modelos de previsão para rodovias locais, como os usados pelo HCM ou HDM-4. Em função da literatura pesquisada, foram consideradas variáveis ligadas à geometria vertical e horizontal. Com o uso de Análise em Componentes Principais (PCA), foram selecionadas três componentes, as quais puderam ser nomeadas como: (1) Limite de velocidade; (2) Classe de Rodovia; e (3) Inclinação da rampa. Em seguida, tais fatores foram relacionados à velocidade de fluxo livre através de Regressão Linear Múltipla, obtendo-se modelos de previsão dessa variável dependente. Os resultados obtidos sugerem que, dentre as variáveis disponíveis no banco de dados usado no estudo, o limite de velocidade, a sinuosidade da via, a inclinação das rampas, a densidade de pontos de acessos, o tipo de pista e a ocupação lindeira são os fatores que mais afetam a velocidade de fluxo livre.

Palavras-chave: Velocidade de fluxo livre; HCM; rodovias; Análise Multivariada de dados.

1. INTRODUÇÃO

A necessidade de padronização e a facilidade da compreensão do conceito de nível de serviço, tanto por técnicos quanto por tomadores de decisão, conduziu ao estabelecimento do *Highway Capacity Manual* – HCM como norma técnica em várias partes do mundo (Andrade e Setti, 2014). O HCM, atualmente na quinta edição (TRB, 2010) apresenta métodos para a estratificação da qualidade do serviço de rodovias em níveis, que refletem intervalos de valores de medidas de desempenho específicas segundo o tipo de via.

Para autoestradas e rodovias de pista dupla, a medida de desempenho usada é a densidade, calculada como a razão entre o fluxo de veículos e a velocidade média da corrente de tráfego. A determinação da velocidade média, por sua vez, requer a

estimativa da velocidade de fluxo livre (*FFS*) de cada trecho estudado, sendo a *FFS* definida pelo HCM como a velocidade média dos veículos quando não há qualquer influência do tráfego na escolha da velocidade praticada pelos motoristas. Assim, a *FFS* depende do comportamento dos motoristas, da fiscalização e das características da via.

Dentro deste contexto, o objetivo deste trabalho é investigar quais fatores podem ser relacionados à velocidade de fluxo livre em autoestradas e rodovias de pista dupla paulistas.

2. MODELOS DE PREVISÃO DA VELOCIDADE DE FLUXO LIVRE

A velocidade de fluxo livre (*FFS*) é definida pelo HCM como a velocidade média dos veículos trafegando em um segmento em condições de fluxo baixo, quando os motoristas têm a liberdade de escolha da velocidade desejada, e não há restrições devido ao tráfego ou dispositivos de controle à jusante.

Para o estabelecimento de um valor para a velocidade de fluxo livre *FFS* em uma seção existente de via, o HCM (TRB, 2010) preconiza duas abordagens. A primeira delas é a medição da velocidade de fluxo livre em campo. Embora essa seja a medida mais recomendável, frequentemente não se dispõem desses dados, devido ao custo associado a pesquisas e equipamentos de coleta. Além disso, é impossível medir a velocidade de um projeto futuro. Assim, a segunda abordagem possível é a estimativa da *FFS*, como descrito na próxima subseção.

2.1. Modelo do HCM 2010

Nesta subseção, são descritos os modelos de previsão da velocidade de fluxo livre usados pelo HCM 2010 para rodovias de pista dupla convencionais e autoestradas. Embora os valores do HCM sejam apresentados no Sistema de Unidades Americano usual, neste artigo todas as equações e valores foram convertidos para o Sistema Internacional, para melhor entendimento.

2.1.1. Rodovias de pista dupla

A velocidade de fluxo livre *FFS* em trechos homogêneos de rodovias de pista dupla pode ser calculada pela seguinte equação, na falta de dados de campo (TRB, 2010):

$$FFS = BFFS - f_{LW} - f_{LC} - f_M - f_A, \quad (1)$$

em que:

BFFS é a velocidade de fluxo livre base da rodovia de pista dupla, em km/h;

f_{LW} é o fator de ajuste segundo a largura da faixa de rolamento, em km/h;

f_{LC} é o fator de ajuste devido à largura dos acostamentos interno e externo, em km/h;

f_M é fator de ajuste para o tipo de divisor central km/h; e

f_A é o fator de ajuste em função da densidade de pontos de acessos à via, em km/h. Entretanto, o HCM não define a velocidade de fluxo livre base (*BFFS*) mais adequada a cada caso. Essa limitação foi citada por Luttinen *et al.* (2005) para rodovias de pista simples e por Roess (2009), para rodovias de pista dupla, durante o processo de desenvolvimento do HCM 2010. Na falta de um modelo de previsão desse parâmetro, o manual recomenda o uso de uma *BFFS* próxima a 100 km/h para rodovias de pista dupla. Outras fontes recomendam o estabelecimento de *BFFS* ligeiramente acima velocidade regulamentada da via (Roess, Prassas, e McShane, 2010).

O fator f_{LW} foi calibrado para valores de largura da faixa entre 3,6 e 3,0 m, e pode impor uma redução na velocidade de fluxo livre de até 10,6 km/h. Já O parâmetro f_{LC} leva em consideração o número de faixas e a soma das larguras dos acostamentos internos e externos à via, sendo o valor máximo considerado em cada caso 1,8 m. Assim, em uma via típica paulista com acostamento externo de 2,5 m e acostamento interno de 0,6 m, a largura livre total seria $1,8 + 0,6 = 2,4$ m. Com isso, tem-se uma redução de até 6,3 km/h e 8,7 km/h, para rodovias com três ou duas faixas por sentido, respectivamente.

Com relação ao tipo de divisor central, é usado um fator de ajuste (f_M), considerando-se que não há redução na *FFS* em rodovias que contam com divisão central física. Em vias cuja divisão consiste apenas em sinalização horizontal, adota-se f_M como 2,6 km/h.

O fator devido à densidade de acessos em rodovias de pista dupla consta na Equação 2:

$$f_A = 0,667 * AcD \quad , \quad (2)$$

em que AcD é a densidade de pontos de acesso por km de via. Consideram-se acessos todos os pontos de ligação direta com a via, que causam “atrito” com a corrente tráfego da rodovia e que possam ser percebidos pelos usuários, até um máximo de 24.

2.1.2. Autoestradas

Para autoestradas, a *FFS* pode ser estimada pela equação (TRB, 2010):

$$FFS = 121 - f_{LW} - f_{LC} - 7,73 TRD^{0,84} \quad , \quad (3)$$

em que:

f_{LW} é o fator de ajuste para largura das faixas de tráfego, definido na Equação 1;

f_{LC} é o fator de ajuste em função do acostamento livre do lado direito, em km/h; e

TRD é a densidade total de acessos controlados, em acessos/km.

O valor inicial para *BFFS* de 121 representa uma média da velocidade em autoestradas americanas (Roess, 2009), não representando necessariamente de forma adequada as condições observadas em rodovias brasileiras.

O fator de ajuste em função do afastamento lateral direito f_{LC} é usado para refletir a redução de velocidade ocasionada quando o acostamento é mais estreito do que 1,8 m. Em função do número de faixas, o f_{LC} pode atingir até 5,8 km/h.

O fator de densidade de acessos (*Total Ramp Density – TRD*) é calculado pela razão entre o número de dispositivos de acessos controlados (de saída e de entrada na rodovia) pela extensão total do trecho estudado.

A Equação 3 é usada pelo HCM para todos os elementos que compõem sistemas de autoestradas, incluindo subtrechos de acessos controlados (*ramps*) ou entrelaçamentos (*weavings*).

2.1.3. Considerações quanto ao modelo do HCM

Nos estudos que subsidiaram a elaboração do HCM 2010 (Roess, 2009), foram tecidas algumas considerações, das quais se destacam:

- A relação entre número de faixas e a *FFS*, usada até o HCM 2000 (TRB, 2000), foi eliminada;
- Não foram avaliadas as variáveis relativas à largura das faixas e acostamentos, devido à falta de dados referente a essas características; e
- Uma análise de diagramas de dispersão quanto às variáveis mostradas nas equações 1 e 2 revelaram que nenhuma delas é capaz de explicar individualmente a velocidade de fluxo livre de forma satisfatória.

2.2. Modelo do Highway Development & Management (HDM-4)

Neste item, é descrito uma outra abordagem para se estimar a velocidade de fluxo livre, usada pelo *Highway Development & Management* (HDM-4). O HDM-4 é um modelo idealizado pelo Banco Mundial para dar suporte na formulação de estratégias, programas e projetos de rodovias. A modelagem matemática inicial foi elaborada ainda na década de 60 pelo *Massachusetts Institute of Technology*, dos Estados Unidos, o *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*, da França, e o *Transport Research Laboratory*, da Inglaterra. Posteriormente, o modelo foi calibrado para as condições dos países em desenvolvimento através de extensas pesquisas de campo realizadas no Caribe, no Quênia, na Índia e no Brasil, com o auxílio de órgãos locais. Atualmente, a quarta versão do modelo é gerenciada por um consórcio internacional (HDM Global).

O HDM-4 é um modelo amplo, composto por três submodelos. Um deles, o *Road User Effects* (RUE), foi desenvolvido objetivando prever o custo da viagem de diversas categorias de veículos. O custo total que incorre aos usuários, composto pelos custos operacionais variáveis e fixos e pelo valor do tempo de viagem, é fortemente relacionado às velocidades praticadas. O modelo de previsão da

velocidade de fluxo livre foi calibrado em rodovias brasileiras, com apoio do GEIPOT, na década de 1980. Foram obtidos quatro conjuntos de relações matemáticas, comparadas posteriormente por Chesher e Harrison (1987), sendo adotadas como oficiais as relações apresentadas em Watanatada *et al.* (1987).

2.2.1. Conceitos e estrutura do modelo do HDM-4

Segundo o modelo de Watanatada (1987), a velocidade de fluxo livre prevista para um determinado veículo num dado trecho é o mínimo probabilístico de um conjunto de velocidades restritivas, determinada por meio da distribuição de Weibull. Essas velocidades restritivas são estimadas a partir de fatores incluindo características do veículo (tais como: força motriz, capacidade de frenagem, carga) e da via (por ex.: condição geométrica vertical e horizontal, condição do pavimento). Esses fatores são:

- *VDRIVE*: baseada na força motriz e na geometria vertical;
- *VBRAKE*: baseada na capacidade de frenagem e na condição geométrica vertical;
- *VCURVE*: função da geometria horizontal;
- *VROUGH*: afetada pela condição do pavimento;
- *VDESIR*: velocidade desejada na ausência de quaisquer fatores restritivos, baseada em fatores econômicos, psicológicos, de segurança e outras considerações.

A velocidade de fluxo livre *FFS* num dado trecho é calculada por:

$$FFS = \frac{\exp\left[\frac{\sigma^2}{2}\right]}{\left[\left(\frac{1}{VDRIVE}\right)^{\frac{1}{\beta}} + \left(\frac{1}{VBRAKE}\right)^{\frac{1}{\beta}} + \left(\frac{1}{VCURVE}\right)^{\frac{1}{\beta}} + \left(\frac{1}{VROUGH}\right)^{\frac{1}{\beta}} + \left(\frac{1}{VDESIR}\right)^{\frac{1}{\beta}}\right]^{\beta}}, (4)$$

em que σ e β são parâmetros da distribuição de Weibull.

O parâmetro β da função determina a forma da distribuição de Weibull. À medida que β se aproxima de 0, *FFS* se aproxima da menor dentre as cinco velocidades restritivas. O parâmetro σ é uma estimativa do desvio padrão do modelo de Weibull. No HDM-4, foi admitido $\sigma = 0$ e $\beta = 0,151$ para veículos leves (Greenwood e Bennet, 1996).

A explicação detalhada do cálculo de cada uma dessas velocidades restritivas e do modelo como um todo pode ser vista em Odoki e Kerali (2006) ou no documento original Watanatada *et al.* (1987).

2.2.2. Considerações quanto ao modelo do HDM-4

Embora o modelo usado pelo HDM-4 tenha sido calibrado com base em dados coletados apenas em rodovias de pista simples, alguns conceitos usados se destacam:

- O modelo do HDM-4 incorpora diretamente a geometria vertical e horizontal da via analisada, para o cálculo de *VDRIVE*, *VBRAKE* e *VCURVE*;
- Cada uma das cinco “velocidades restritivas” reflete indiretamente o impacto de não apenas uma, mas um conjunto de variáveis. *VDRIVE*, por exemplo, é função da inclinação dos aclives, sua extensão e frequência em um dado trecho rodoviário.

2.3. Considerações finais

À luz da revisão da literatura apresentada, este trabalho analisa a influência de diversas características da via na velocidade de fluxo livre, a partir das seguintes suposições:

- O efeito das várias características viárias sobre a velocidade não pode ser avaliado isoladamente. Dessa forma, faz-se necessário o uso de métodos de Análise Multivariada de Dados;
- Parâmetros ligados à geometria horizontal e vertical devem ser considerados;
- As variáveis originais a serem usadas devem ser inicialmente combinadas conforme a natureza da sua influência sobre o comportamento dos motoristas.

3. O BANCO DE DADOS

Os dados disponíveis para este estudo foram coletados por laços indutivos instalados em trechos de autoestradas e rodovias de pista dupla no estado de São Paulo: SP-021 (Rodoanel Oeste), SP-280 (Castelo Branco); SP-270 (Raposos Tavares); e SP-348 (Bandeirantes). No total, foram usados 34 trechos monitorados por sensores de tráfego. A Figura 1 mostra as rodovias estudadas e a localização dos sensores de tráfego.

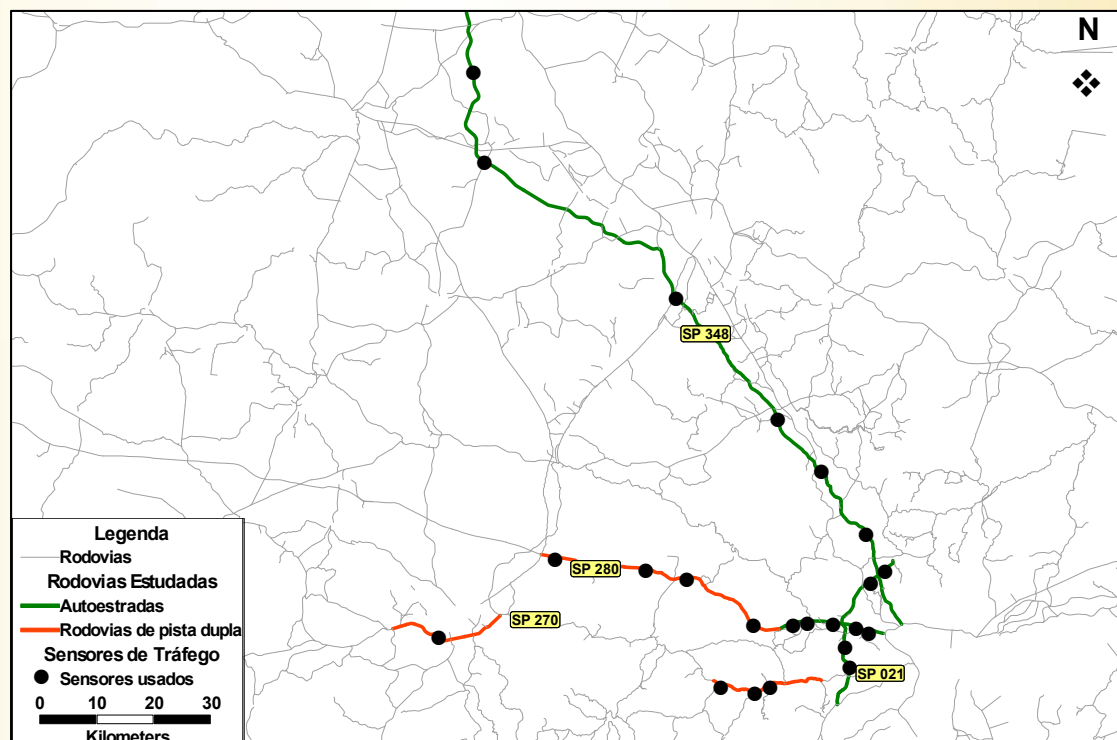


Figura 1: Localização das estações de monitoramento de tráfego usadas neste estudo

Essas estações de monitoramento de tráfego forneceram uma amostra de 788.122 observações, coletadas entre janeiro de 2010 e fevereiro de 2012. Cada observação consiste em uma contagem classificada e da velocidade média pontual de cada classe veicular, para intervalos de cinco ou seis minutos. Os veículos são classificados como leves (automóveis e picapes leves), pesados (caminhões e ônibus) ou motos, em função do seu comprimento.

A velocidade de fluxo livre *FFS* real a cada ponto foi estimada como descreve-se a seguir. Primeiramente, foi calculada a média das velocidades observadas para cada sensor a intervalos de fluxo de 50 veíc/h. Admitindo-se que a velocidade média dos automóveis é insensível ao aumento do volume de tráfego para fluxos baixos (Andrade e Setti, 2014), a *FFS* foi estimada como a média das velocidades médias observadas para os sete intervalos de 50 cp/(h.faixa), até 350 cp/(h.faixa). O desvio padrão das médias não atingiu 2 km/h em nenhum caso, o que reforça a suposição de que, para baixos fluxos de tráfego, a velocidade média dos automóveis é praticamente constante.

Em seguida, foram determinados os valores das variáveis relativas às características da via. Essas variáveis foram definidas usando-se o método apresentado por Andrade

e Setti (2011) e caracterizam os segmentos homogêneos nos quais as estações de coleta se situam, identificados segundo o km e sentido de cada ponto de coleta. Os dados produzidos foram então organizados na forma de um banco de dados. As variáveis relativas aos trechos são:

- Tipo [variável categórica – Autoestrada (0); ou Rodovia de Pista Dupla(1)];
- Ocupação, [variável categórica – Rural (0); ou Urbana (1)];
- Número de faixas [variável numérica (número inteiro) – “N”];
- *Rise and Fall*, (variável numérica, em m/km – “RF”), definido como a distância vertical total percorrida nas subidas e descidas, em metros, por quilômetro de rodovia;
- Número de Rampas (variável numérica, em rampas/km – “nRF”), definida como a quantidade de rampas individuais por km de rodovia, refletindo o grau de ondulações do terreno;
- Curvatura (variável numérica, em °/km – “Curv”), definida como a deflexão total das curvas horizontais, em graus, percorrida a cada quilômetro de rodovia;
- Greide médio, em %, e extensão da rampa, em km (ambas variáveis numéricas, respectivamente “i” e “E”). Note-se que, para o cálculo da FFS, o comprimento da rampa é a extensão do início do greide até o ponto de coleta dos dados;
- Espaçamento entre os acessos mais próximos a jusante e a montante (“Spac”, variável numérica);
- Densidade de pontos de acesso, conforme definido pelo HCM (TRB, 2010); e
- .

Como no estudo que subsidiou o HCM 2010 (Roess, 2009), não havia dados suficientes para permitir a investigação do efeito da largura das faixas e acostamentos, de forma que essas variáveis não foram analisadas neste trabalho.

4. MÉTODO

Com base nas suposições apresentadas no item 2.3 e no banco de dados tratado foi aplicado neste trabalho um método composto por três etapas principais:

1. Foi feita uma Análise de Componentes Principais (Análise Fatorial – AF), com o objetivo de criar e caracterizar componentes – novas variáveis independentes não correlacionadas entre si – a partir da agregação das variáveis independentes originais do banco de dados. Foram feitas análises sem rotação das variáveis, bem como com o uso dos métodos QUARTIMAX e VARIMAX;
2. Usando-se as componentes geradas em cada caso como variáveis independentes, foram feitas três análises por regressão linear múltipla, baseadas no método *Stepwise*, no qual as variáveis independentes pouco significativas foram eliminadas da análise uma a uma, sendo possível assim identificar os fatores que mais influenciam a variável dependente em questão

(FFS); e

3. Análise dos dados.

Com isso foram gerados três modelos. Para escolher o melhor deles, além da análise R^2 e demais indicadores estatísticos, foram impostas certas condições quanto aos ajustes, entre as quais se destacam:

- O agrupamento resultante da AF deve produzir componentes lógicas; e
- Os coeficientes das variáveis devem fazer sentido (por ex., um aumento em variáveis ligadas à sinuosidade da rodovia não deve resultar em aumento de velocidade).

O método proposto foi implementado no *software* de análise estatística IBM SPSS 22. As conclusões dessa análise estão mostradas a seguir.

4.1. Análise em Componentes Principais

Comparando-se os três modelos (AF Normal, rotação QUARTIMAX e VARIMAX), decidiu-se adotar o gerado pela rotação VARIMAX, que melhor atendeu às duas condições descritas no item anterior. A seguir, são mostrados os resultados produzidos para a AF rotacionada pelo método VARIMAX e a subsequente regressão linear múltipla, cujas variáveis independentes foram as componentes produzidas pela AF.

Na etapa de Análise em Componentes Principais, todas as variáveis foram consideradas relevantes pela técnica de AF, sendo que os valores de extração oscilaram entre 0,744 e 0,911. As cinco componentes cujos autovalores obtidos se mantiveram superiores à um (1) foram extraídas; essas componentes são capazes de explicar até 82,16% da variância total dos dados, conforme verifica-se na Tabela 1.

Tabela 1: Variância total explicada

Componente ^e	Valores próprios iniciais			Somadas de extração de carregamentos ao quadrado		Somadas rotativas de carregamentos ao quadrado	
	Total	% de variância	% acumulada	Autovalor Total	% de variância	Total	% de variância
1	4,478	37,314	37,314	4,478	37,314	2,428	20,237
2	2,049	17,079	54,393	2,049	17,079	2,176	18,132
3	1,249	10,411	64,803	1,249	10,411	1,938	16,146
4	1,054	8,782	73,586	1,054	8,782	1,777	14,811
5	1,029	8,576	82,161	1,029	8,576	1,540	12,835

Observando-se a Matriz de Componentes rotacionados (Tabela 2), nota-se que há variáveis relacionadas em cada componente. Nesse contexto, as componentes criadas passam a refletir aspectos mais amplos relacionados à velocidade de fluxo livre, e poderiam ser renomeadas:

1. Velocidade regulamentada (*PostS*): a primeira componente da análise deu especial importância ao limite legal de velocidade, reforçando o papel dessa variável no comportamento dos motoristas;
2. Comprimento das rampas (*L e E*): a segunda componente unifica o efeito das duas variáveis que descrevem a extensão das rampas em análise;
3. Classe da rodovia (*Tipo, Ocup, RF, Curv e AcD*): esta componente agrega todas as variáveis que descrevem o padrão da rodovia, sua geometria e as características do ambiente lindeiro;
4. Relevo (*nRF*): o número de rampas por km reflete como a rodovia ajusta-se ao relevo da região e foi mantido isolado nesta componente; e
5. Inclinação das rampas (*i*): esta componente reflete o efeito da declividade das rampas e foi também considerada de forma individual.

Tabela 2: Cargas fatoriais das variáveis originais em relação às componentes

Variável	Componente				
	1	2	3	4	5
Tipo	-,252	-,603	,573	-,132	,028
Ocup	-,567	-,088	,383	,637	,172
N	-,005	,183	-,878	-,183	-,087
PostS	,904	,007	-,124	,030	-,122
RF	,435	-,507	,352	,373	,407
nRF	,014	-,164	,038	,931	,000
Curv	-,633	-,053	,400	,423	,042
i	-,175	-,005	,063	,025	,902
L	,007	,806	-,066	-,348	-,221
E	,114	,841	-,152	-,039	,073
AcD	-,371	-,195	,536	,101	,558
Spac	,676	,301	,270	,012	-,373

4.2. Regressão linear múltipla

Neste item, são mostrados relatórios produzidos pelo SPSS para a regressão múltipla, mantendo-se a *FFS* como variável dependentes e as cinco componentes obtidas como independentes. Além de um R^2 satisfatório, de 0,848, foi verificado uma distribuição dos resíduos sem tendência clara (Figura 2), dentro do esperado, estatísticas *t* elevadas e erro próximo a 0.

Na Tabela 3, verifica-se que o algoritmo *Stepwise* produziu um modelo constituído pelas Componentes 1 (Limite de velocidade), 3 (Classe de rodovia) e 5 (Inclinação da rampa), além de uma constante, que representa uma velocidade de fluxo livre base (*BFFS*), como na estrutura mostrada nas equações 1 e 3. Neste caso, a *BFFS* proposta foi de cerca de 112 km/h, diferentemente do valor de 121 km/h adotado pelo HCM para autoestradas.

Tabela 3: Coeficientes do modelo

Componentes	B	Erro padrão	Beta	t	Sig.
Constante (<i>BFFS</i>)	111,176	0,800		138,993	0,000

Velocidade regulamentada	9,896	0,812	0,828	12,188	0,000
Classe de rodovia	-3,615	0,812	-0,303	-4,453	0,000
Inclinação da rampa	-3,462	0,812	-0,290	-4,264	0,000

Gráfico P-P Normal de Regressão Resíduos padronizados

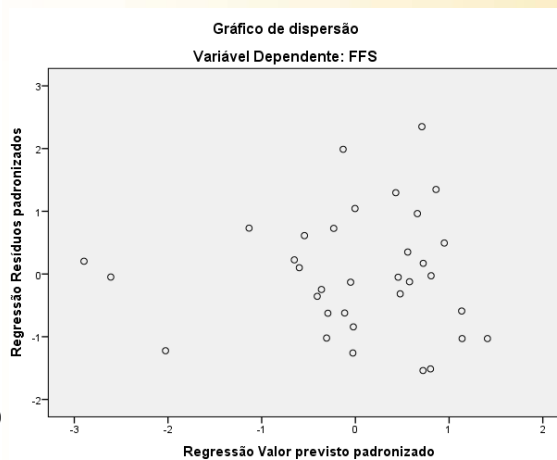
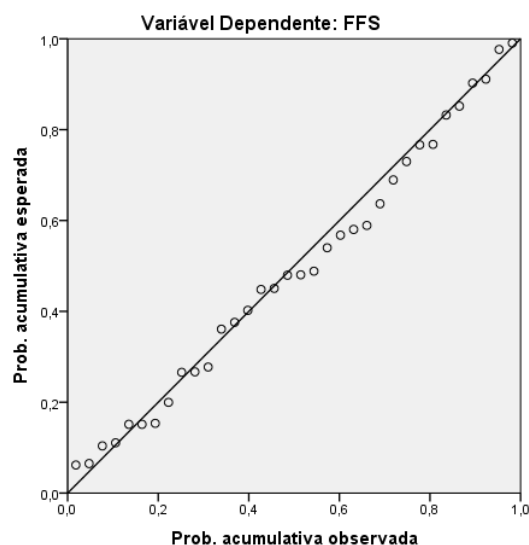


Figura 2: Análise dos resíduos

5. ANÁLISE

Os valores obtidos para o R^2 ajustado e estatística Z em cada um dos três modelos testados estão resumidos na Tabela 4. Comparando-se as análises, nota-se que os valores de R^2 obtidos são similares, sendo todos os valores da estatística Z satisfatórios. Assim, o modelo escolhido (em destaque) foi o que melhor atendeu às restrições expostas na seção anterior.

Tabela 4: R^2 ajustado e estatística Z caso a caso

Método	Regressão por <i>Stepwise</i>	
	R^2 ajustado	Z
AF normal	0,866	107,4
QUARTIMAX	0,858	67,4
VARIMAX	0,848	62,2

Quanto à relação entre as variáveis, nota-se que velocidade regulamentada (Componente 1) é o principal fator capaz de explicar a FFS, sendo esta proporcionalmente tão maior quanto maiores for o limite legal de velocidade, sendo o coeficiente B próximo a 1 e a estatística t elevada. As demais componentes têm

relação inversamente proporcional com a FFS, isto é: (a) A velocidade de fluxo livre é menor em rodovias de menor padrão e em áreas urbanas, especialmente quando há maior presença de acessos; e (b) Quanto mais restritiva a geometria viária, menor a velocidade de fluxo livre.

6. CONCLUSÕES

Neste trabalho, foram investigadas quais características da rodovia se relacionam com a escolha da velocidade de fluxo livre *FFS* em autoestradas e rodovias de pista dupla paulistas. Para tanto, foi aplicado um método baseado em Análise por Componentes Principais e Regressão Linear Múltipla. Como resultados finais, concluiu-se que algumas variáveis afetam de forma combinada e relevante a *FFS*:

1. Velocidade regulamentada da rodovia;
2. Tipo de rodovia, curvatura, ocupação lindeira e densidade de pontos de acesso;
3. Inclinação de rampas.

Para trabalhos futuros, é recomendada a validação dos resultados verificados neste estudo com a inclusão de trechos de entrelaçamento e acesso controlado (*ramps*) na análise, os quais, segundo o HCM (TRB, 2010), apresentam *FFS* similar à de trechos homogêneos convencionais em condições de fluxo livre. Por fim, recomenda-se, a partir dos resultados preliminares alcançados, a elaboração de um modelo de previsão da *FFS* a exemplo do usado pelo HCM 2010 ou HDM-4.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da ARTESP e das concessionárias CCR RodoAnel, CCR ViaOeste e CCR AutoBan, que disponibilizaram os dados de tráfego. Os autores agradecem o apoio financeiro do CNPq, através de uma bolsa de mestrado e uma bolsa de produtividade em pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andrade, G.; Setti, J. R. (2011) Método para Caracterização e Classificação de Trechos Homogêneos Rodoviários. In: *Anais do 7º Congresso Brasileiro de Rodovias e Concessões – CBR&C 2011*, Foz do Iguaçu, PR (CD-ROM), 14 p.
- Andrade, G. R.; Setti, J. R. (2014) Speed-Flow Relationship and Capacity for Expressways in Brazil. In: *TRB 93rd Annual Meeting Compendium of Papers*, TRB, Washington, D.C., p. 1–18.
- Chesher, A.; Harrison, R. (1987) *The Highway Design and Maintenance Standards Model. Volume 1, Vehicle Operating Costs: Evidence from Developing Countries*. Transportation Department, World Bank, Washington, D.C.
- Greenwood, I.D. e C.R. Bennet (1996) The effects of Traffic Congestion and Fuel Consumption. *Road & Transport Research, Journal of Australian and New*

- Zealand Research and Practice*, ARRB Transport Research, V. 5, n. 2, South Victoria, Australia.
- Luttinen, R. T.; Dixon, M.; Washburn, S. (2005) Two-Lane Highway Analysis in HCM 2000. In: *84th Annual Meeting of Transportation Research Board*, 17 pp.
- Odoki, J. B. e H. G. R. Kerali (2006) *The Highway Development and Management Series: Volume Four – Analytical Framework and Model Descriptions*. The World Road Association (PIARC), Paris, France.
- Roess, R. (2009) *Re-Calibration of the 75-mi/h Speed-Flow Curve and the FFS Prediction Algorithm for HCM 2010*. National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, National Research Council, 17 p.
- Roess, R., Prassas, E. S., & McShane, W. R. (2010) *Traffic Engineering 4ª ed*. Upper Saddle River: Prentice Hall.
- TRB (2000) *Highway Capacity Manual 2000*. Transportation Research Board, The National Academies, Washington, D.C.
- TRB (2010) *Highway Capacity Manual 2010*. Transportation Research Board, The National Academies, Washington, D.C.
- Watanatada, T.; Dhareshwar, A.; Rezende-Lima, P. R. S. (1987) *The Highway Design and Maintenance Standard Model Volume II, Vehicle Speeds and Operating Costs: Models for Road Planning and Management*. World Bank, Transportation Department, Washington, D.C.