

## ELABORAÇÃO DE MODELO DA PREVISÃO DA VELOCIDADE OPERACIONAL DE RODOVIAS EM PISTAS SIMPLES CONSIDERANDO OS VEÍCULOS DE CARGA

**Zélia Silveira d’Azevedo**  
**Christine Tessele Nodari**  
**Daniel Sergio Presta Garcia**  
**Sander Fraga Farinha da Silva**  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

### RESUMO

Os acidentes de trânsito são considerados uma das principais causas de morte no mundo. Estes são causados por uma combinação de fatores, porém a velocidade inadequada aparece, geralmente, como a causa principal. Além da questão do excesso de velocidade, também é importante para a segurança no trânsito a investigação da relação entre acidentes com veículos e as características geométricas das rodovias. A velocidade operacional ( $V_{85}$ , ou 85º percentil) possui uma relação profunda com a questão da segurança. Estudos demonstram que motoristas dirigindo a velocidades superiores ao  $V_{85}$  apresentam maior envolvimento em acidentes do que aqueles que conduzem com velocidades até esse valor. Muitos modelos foram desenvolvidos para prever perfis de velocidades de veículos de passeio em rodovias de pistas simples, porém somente alguns também consideram perfis de velocidades de veículos de carga. Nesse contexto, o presente trabalho apresenta como objetivo propor um modelo de estimativa do perfil de velocidade operacional para diferentes tipos de veículos de carga em função das características geométricas de rodovias de pistas simples.

### ABSTRACT

Traffic accidents are considered one of the leading causes of death in the world. These are caused by a combination of factors but speeding usually appears as the main cause. In addition to the speeding issue, it is also important for traffic safety to investigate the relationship between motor vehicle accidents and the geometric characteristics of highways. The operational speed ( $V_{85}$ , or the 85th percentile speed) has a deep relation with road traffic safety. Studies show that motorists driving at speeds higher than the  $V_{85}$  have greater involvement in accidents than those who drive at speeds up to this value. Many models have been developed to predict passenger vehicle speed profiles on two-lane highways, but only a few also consider truck speed profiles. In this context, the present work aims to propose a model for predicting the operating speed profile for different types of trucks as a function of the geometric characteristics of two-lane highways.

### 1. INTRODUÇÃO

De acordo com os dados levantados pela Organização Mundial da Saúde em 2018, estima-se que o número de mortes no trânsito é de 1,35 milhões de pessoas a cada ano em todo o mundo. Embora esse número tenha se estabilizado nos últimos anos, ainda é considerado elevado.

Entre as novas metas dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), definidas na Assembleia Geral das Nações Unidas de setembro de 2015 tem-se a ODS 3.6 que estabelece a redução, pela metade, do número global de mortes e lesões relacionadas ao trânsito até 2020 (WHO, 2018). Estudos realizados em diversos países apontam o excesso de velocidade como um dos principais problemas de segurança viária. As velocidades maiores aumentam a probabilidade de ocorrência de acidentes, bem como a severidade dos mesmos (FHWA, 2007).

Além da questão do excesso de velocidade, também é importante para a segurança no trânsito a investigação da relação entre acidentes com veículos e as características geométricas das rodovias (Peng *et al.*, 2012). Essas afetam as condições de segurança de diferentes maneiras, como na habilidade do motorista em manter o controle do veículo e identificar situações e características perigosas; na existência de oportunidades de conflitos, tanto em relação à quantidade quanto ao tipo; na consequência de uma saída de pista de um veículo desgovernado; e no comportamento e na atenção dos motoristas (Nodari, 2003). Dessa forma, uma geometria

inadequada pode ocasionar acidentes, uma vez que os elementos geométricos e de seção transversal, em combinação com as características do tráfego e da área em que a via está inserida, estabelecem um ambiente no qual os condutores escolhem velocidades razoáveis e confortáveis (FHWA, 2007).

Existem diversos modelos para estimativa de velocidade operacional em rodovias de pista simples considerando os veículos de passeio, porém há poucos modelos para a previsão da velocidade operacional de veículos de carga. Nesse contexto, torna-se imperativo que se ampliem o conhecimento sobre o real desempenho dos veículos de carga em rodovias de pista simples no que tange a velocidade operacional. O presente trabalho tem por objetivo geral propor um modelo de estimativa do perfil de velocidade operacional para diferentes tipos de veículos de carga em função das características geométricas de rodovias de pistas simples.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

Existem vários estudos realizados que comprovam que há uma relação estreita de causa e efeito entre a velocidade, a ocorrência de acidentes e a gravidade dos mesmos (García, 2002). Segundo Garber e Ehrhart (2000), em seus estudos sobre rodovias do estado da Virginia, Estados Unidos, consideram possível a geração de modelos que relacionam a taxa de acidentes aos efeitos provenientes da velocidade, fluxo de veículos e características geométricas das vias. Lamm *et al.* (1995), em estudo anterior sobre rodovias da Alemanha e dos Estados Unidos, já apresentava modelos para estimativa da velocidade operacional e taxa de acidentes em função da taxa angular de curvatura e da largura da pista.

O conceito de velocidade operacional sofreu várias adequações ao longo do tempo. De acordo com Fitzpatrick *et al.* (2003) o termo velocidade operacional é geralmente usado para descrever a real velocidade de um grupo de veículos ao longo de um determinado segmento da via. A velocidade operacional é geralmente representada pelo 85º percentil ( $V_{85}$ ) da distribuição de velocidades observadas, obtido a partir da curva de distribuição de frequência acumulada.

A  $V_{85}$  possui uma relação profunda com a questão da segurança. Estudos demonstram que motoristas dirigindo a velocidades superiores a esse valor apresentam maior envolvimento em acidentes do que aqueles que conduzem com velocidades inferiores a ele (DER/SP, 2006). Muitos modelos foram desenvolvidos para prever perfis de velocidades de veículos de passeio em rodovias de pistas simples, porém somente alguns também consideram perfis de velocidades de veículos pesados. Por essa razão, a maioria dos modelos de consistência geométrica são baseados somente nos perfis de velocidade de veículos de passeio (Llopis-Castelló *et al.*, 2018).

No entanto, os projetos geométricos de rodovias devem considerar como veículo de projeto aquele que seja representativo da frota que irá utilizar ou utiliza a rodovia. No Brasil, a presença de veículos comerciais (ônibus e/ou caminhões convencionais) na composição da frota é significativa. Segundo o estudo do Laboratório de transportes – LABTRANS (2008), a participação de veículos pesados varia de 48% (nas rodovias de menor VDM) até 31% (nas rodovias com maior VDM). Portanto, estes tendem a condicionar as características geométricas dos projetos de rodovias.

Uma rodovia com geometria inadequada pode ocasionar acidentes, uma vez que os elementos geométricos e de seção transversal, em combinação com as características do tráfego e da área em que a via está inserida, estabelecem um ambiente no qual os condutores escolhem suas

velocidades (Torres, 2015). Os perfis de velocidade representam a variação da velocidade diretriz ou da velocidade operacional ao longo das vias. É um dos dados mais relevantes para a análise de segurança viária, em particular, para a análise da consistência geométrica. Para construir os perfis de velocidade, é necessário usar modelos que possibilitem correlacionar a velocidade operacional com as características geométricas da rodovia (Echaveguren e Díaz, 2013).

Desde 1954, pesquisadores investigam o comportamento da  $V_{85}$ . A maioria destes correlacionam a velocidade operacional com as características geométricas do alinhamento. Existem modelos para estimar a velocidade operacional em curvas e em tangentes. O formato do modelo, as variáveis independentes e os coeficientes de correlação são diferentes de um modelo para outro, em função da diferença de comportamento dos condutores de uma região para outra (Castro *et al.*, 2008).

### 3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O estudo está organizado em cinco etapas.

#### 3.1. Etapa 1: Seleção da rodovia

Como cenário do estudo, foi selecionada uma rodovia de pista simples, localizada em zona rural do Estado do Rio Grande do Sul, Brasil. Essa rodovia apresenta raios de curvatura horizontal entre 100 e 2500 metros e rampas entre -9% e +9%, características essenciais para desenvolvimento do estudo. A seleção do trecho de estudo foi realizada considerando como princípio básico atender aos seguintes critérios: (i) ser em uma rodovia inserida em zona rural, não inserida em zona urbana (trechos em zona urbana não serão objeto de estudo neste trabalho); (ii) possuir pista simples; (iii) receber tráfego de veículos de carga na composição da frota circulante; e (iv) estar em boas condições de manutenção, principalmente quanto às condições do pavimento e da sinalização.

#### 3.2. Etapa 2: Identificação dos segmentos em curva considerando condicionantes

A importância de se atender a condicionantes, na seleção dos segmentos em curva para o estudo, está em reduzir ou eliminar a interferência de outros fatores sobre a velocidade operacional. As condicionantes a ser consideradas são: (a) Condicionante de Fluxo Livre; (b) Condicionante de Independência; (c) Demais Condicionantes Geométricas; (d) Condicionante da Inexistência de Interseções Próximas; (e) Condicionante da Inexistência de Objetos Adjacentes à Via; (f) Condicionante de Pavimento; (g) Condicionante Climática; (h) Outras Condicionantes (García, 2002).

#### 3.3. Etapa 3: Coleta dos dados de velocidades

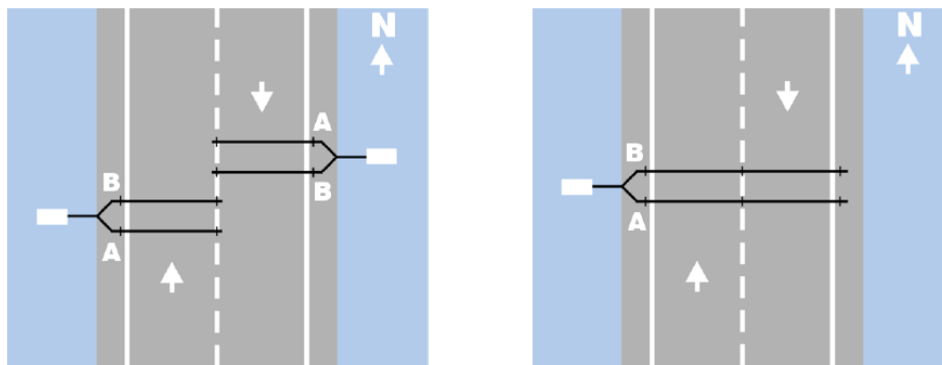
Os dados necessários para a determinação da velocidade operacional dos veículos de carga foram coletados usando o método de coleta de velocidade pontual, respeitando o tamanho mínimo da amostra. Para considerar como representativas as medições de velocidades pontuais obtidas em campo para cada classe de veículos de carga, a quantidade mínima a ser considerada foi definida pela Equação 1 apresentada pelo ITE (1994).

$$N = \frac{S^2 K^2 (2 + U^2)}{2E^2} \quad (1)$$

Onde:  $N$ : número mínimo de dados amostrais a serem coletados;

- S: desvio padrão estimado da amostra;
- K: constante correspondente ao nível de confiança desejado;
- U: constante de correção ao percentil analisado (para 85% = 1,04);
- E: erro admissível para a estimativa.

O objetivo da coleta da velocidade pontual é o de determinar a velocidade do veículo no instante que ele passa por um determinado ponto ou seção da via. Na coleta da velocidade pontual foram utilizados os equipamentos da MetroCount (MC-5600), que operam com duas mangueiras de ar e são alimentados por um conjunto de baterias alcalinas. Após o término das medições, os dados são descarregados em um computador contendo o software da MetroCount (MC Report). O MC-5600 utiliza a classificação de veículos ARX, que é uma adaptação da AustRoads94 (MetroCount, 2019). Para a coleta de dados em pistas bidirecionais pode-se instalar uma unidade para cada sentido ou um mesmo equipamento para os dois sentidos, conforme indicado na Figura 1. No presente estudo, foram utilizadas as duas configurações.



**Figura 1:** Modalidades de instalação do equipamento para pistas bidirecionais.

#### 3.4. Etapa 4: Tratamento e análise dos dados

Para cada categoria de veículos foram calculados o desvio padrão e a média, com o objetivo de verificar o atendimento ao tamanho mínimo da amostra (Equação 1) também por categoria. Esse valor foi comparado com número de medições obtidas para cada categoria de veículos em cada curva analisada. Não atingindo o tamanho mínimo da amostra, a categoria foi eliminada. Com o intuito de evitar tendências e influências indesejadas para o cálculo do modelo matemático, a amostra foi aleatorizada. A amostra foi dividida em duas partes, 70% foi usada para a estimação do modelo matemático, e os 30% restantes foram usados para se fazer o teste e validação do modelo matemático estimado. Em seguida, foram calculadas as velocidades operacionais ( $V_{85}$ ) por curva, por sentido e por categoria de veículos.

#### 3.5. Etapa 5: Estimação de Modelos de Previsão da Velocidade Operacional para Diferentes Tipos de Veículos de Carga

A partir dos resultados da etapa anterior, foram estimados modelos de previsão da velocidade operacional para diferentes tipos de veículos de carga e foi realizada a avaliação da qualidade do modelo e sua validação. Para a avaliação da qualidade do modelo de estimativa da velocidade operacional para diferentes tipos de veículos de carga, foi verificado se as variáveis são estatisticamente significativas para o nível de significância adotado e o valor do coeficiente de determinação do modelo ( $R^2$ ). Para validação do modelo estimado, foi calculado o valor predito através do modelo e o resultado foi comparado ao valor medido, e assim, foi possível verificar se o modelo é ou não válido para a utilização pretendida.

#### 4. ESTUDO DE CASO: RODOVIA ERS-122

A rodovia selecionada para o estudo de caso foi a ERS-122, localizada no Estado do Rio Grande do Sul. Trata-se de segmento em pista simples, inserido em zona rural, classificado como Classe III, situado em região ondulada e com velocidade diretriz de 60 km/h. O volume médio diário observado em 2019 é de 3.188 veículos, sendo a frota circulante é composta por 49% de veículos de passeio, 36% de veículos de carga e 15% de coletivos.

##### 4.1. Etapa 1: Seleção da rodovia

O trecho objeto do estudo apresenta boas condições de manutenção, principalmente quanto às condições do pavimento e da sinalização. Possui, ainda, pista de rolamento de 7,00 metros e acostamentos de largura variável entre 1,00 e 2,00 metros.

A geometrização do trecho de estudo, ou seja, a obtenção do alinhamento horizontal e vertical, foi realizada com o uso da ferramenta SAEPRO - Sistema Avançado para Estudos e Projetos Viários. Tal procedimento foi necessário com a finalidade de selecionar os segmentos em curvas que atendessem as condicionantes elencadas, bem como ao plano amostral considerando os raios de curvatura horizontal e rampas.

O trecho selecionado possui 38,84 km de extensão. Apresenta 93 curvas horizontais com raios variando entre 100 m e 2.500 m; 140 curvas verticais com projeções entre 50 m e 500 m; rampas em aclave entre 0,002% e 9,15%; rampas em declive entre -8,8903% e -0,074%.

##### 4.2. Etapa 2: Identificação dos segmentos em curva considerando condicionantes

A identificação dos segmentos em curvas foi baseada na verificação das condicionantes propostas. Como ferramentas principais para análise dos segmentos, foram utilizados o software SAEPRO e posterior vistoria ao trecho. A independência entre as curvas é verificada através da extensão da intertangente. No presente estudo, o valor mínimo adotado foi de 200m.

Para o presente estudo, os valores das inclinações das rampas consideradas estão dentro do intervalo de -5% a +5%. Foram estabelecidos 3 níveis de tratamento para as rampas: (i) Aclave:  $i > +2\%$ ; (ii) Nível:  $-2\% \leq i \leq +2\%$ ; e (iii) Declive:  $i < -2\%$ . A identificação da inclinação das rampas foi realizada com base no relatório de altimetria gerado pelo SAEPRO.

Foram selecionados segmentos sem a influência de interseções e acessos, bem como sem a presença de objetos adjacentes à via. Inicialmente a seleção foi realizada através da visualização das imagens de satélite ao longo do trecho com o uso do SAEPRO. Após foi realizada vistoria de campo, para analisar o trecho sob o ponto de vista do condutor, descartando os locais com possíveis objetos adjacentes à via que pudessem ser identificados como uma interferência ao tráfego de veículos.

Foram identificadas 15 curvas possíveis para estudo. Para o presente estudo, além dos 3 níveis de inclinação de rampa, foram também estabelecidos 3 níveis de tratamento para os raios, ou seja,  $R < 200$  m,  $200$  m  $< R < 600$  m e  $R > 600$  m.

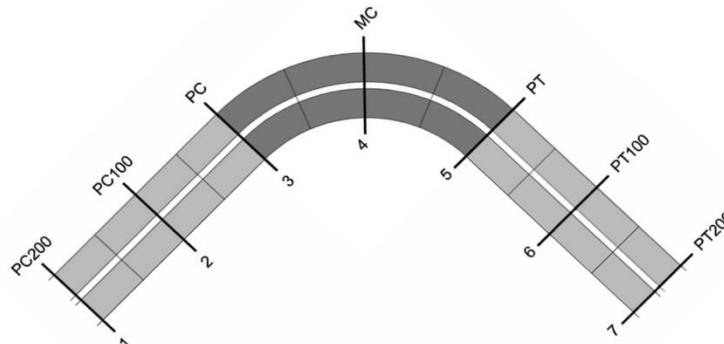
##### 4.3. Etapa 3: Coleta dos dados de velocidades

O tamanho da amostra de medições de velocidades pontuais por tipo de veículo de carga foi determinado pela metodologia do ITE (1994). Foram adotados os valores recomendados para

rodovias de pista simples e análise para obtenção da velocidade 85º percentil. Portanto, para um desvio padrão de 8,5 km/h, nível de confiança de 95% ( $K=1,96$ ) e uma constante de correlação para a  $V_{85}$  ( $U=1,04$ ) e erro igual a 6km/h, obteve-se um tamanho mínimo da amostra de 12 medições de velocidades pontuais por tipo de veículo de carga.

Foram coletados dados de velocidades pontuais em 6 curvas, em ambos sentidos, totalizando 12 pontos de coleta nos centros das curvas. Os tubos pneumáticos são fixados transversalmente à rodovia, de forma paralela e a uma distância de um metro entre si, atravessando a faixa de rolamento. A unidade armazenadora foi pré-programada para a distância entre os tubos e pela diferença de tempos entre os dois estímulos o equipamento obtém a velocidade.

Com o objetivo de minimizar os erros na classificação dos veículos, em três curvas foram instalados três sensores na entrada e três na saída das mesmas com distância de 100 m entre si (Figura 2). O objetivo foi obter a classificação correta dos veículos pesados que efetivamente entraram e saíram das curvas.







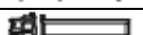




**Figura 2:** Locais de instalação dos tubos pneumáticos.

A coleta foi realizada em dias de semana, durante dois dias consecutivos em cada curva, no horário das 7:00 às 19:00. Nas curvas 33, 37 e 76 foram implantados 2 sensores e nas curvas 47, 75 e 81 utilizaram-se 8 sensores (2 no centro, 3 na entrada e 3 na saída).

#### 4.4. Etapa 4: Tratamento e análise dos dados

A primeiro passo no processo de tratamento dos dados obtidos em campo foi realizar a verificação da conformidade da informação apresentada pelo software dos equipamentos referente à classificação dos veículos usando os dados coletados nas três curvas onde foram instalados sensores antes e depois do meio da curva. Dessa forma, com os dados coletados nestas 3 curvas foi realizada a comparação da classificação do veículo que passava em cada sensor. Havendo discrepância na classificação, a informação era desconsiderada.

Após verificação da classificação, foram eliminados os veículos de passeio, as motocicletas e os veículos com *headway* inferior a 4 segundos. A categorização dos veículos foi realizada através do software proprietário da fabricante dos equipamentos, segundo a classificação ARX (Figura 3). Para cada categoria de veículos pesados, foram calculados o desvio padrão e a média, com o objetivo de verificar o tamanho mínimo da amostra para cada categoria. Esse valor foi comparado com número de medições obtidas para cada categoria de veículos em cada curva analisada. Não atingindo o tamanho mínimo da amostra, a categoria era eliminada.

Categoria	Descrição	Veículo dominante	Agregação
TB2	Caminhão ou ônibus de dois eixos		Médio
TB3	Caminhão ou ônibus de três eixos		
T4	Caminhão de quatro eixos		
ART3	Veículo de três eixos articulado		Pesado
ART4	Veículo de quatro eixos articulado		
ART5	Veículo de cinco eixos articulado		
ART6	Veículo de seis eixos ou mais articulado		
BD	Caminhão articulado com reboque		
DRT	Rodotrem ou caminhão articulado com mais de um reboque		

**Figura 3:** Classificação ARX para veículos de carga.

As categorias descartadas do estudo em função do tamanho mínimo da amostra foram as do tipo T4, ART3 e DRT. Portanto, para o presente estudo foram utilizadas as categorias de veículos de carga TB2, TB3, ART4, ART5 e ART6.

A amostra total obtida em campo foi dividida em duas partes, uma para a estimação dos modelos de previsão de velocidades operacionais ( $V_{85}$ ) e outra para a validação modelos. Para cada parte, foram calculadas as velocidades operacionais ( $V_{85}$ ) observadas por curva, por sentido e por categoria de veículos.

#### 4.5. Etapa 5: Estimação de Modelos de Previsão da Velocidade Operacional para Diferentes Tipos de Veículos de Carga

Para a estimação dos modelos de velocidade operacional, foi utilizada a técnica de análise de regressão linear múltipla. A classificação das variáveis quanto ao tipo, unidade e intervalo de variação são: raio de curvatura horizontal (variável contínua, obtida pela geometrização em metros, variando entre 140 e 1.000 m); inverso do raio de curvatura (variável contínua, obtida pela inversão do raio de curvatura, variando entre 0,001/m e 0,006979/m); inclinação longitudinal (variável contínua, obtida pela geometrização em valores percentuais, com intervalo definido entre -5% e +5% e valores obtidos variando entre -4,70% e +4,70%); bordo da curva (variável do tipo *dummy*, obtida pela geometrização, variando entre interno e externo).

Os modelos de estimativa da velocidade operacional para veículos de passeio em função das características planimétricas são considerados por grande parte dos pesquisadores como os mais representativos do comportamento do condutor quanto a escolha da velocidade de operação. Os perfis de velocidade dos veículos pesados, entretanto, dependem tanto da planimetria como da altimetria.

As tabelas 1 a 6 apresentam os resultados obtidos para cada modelo estimado.

**Tabela 1:** Modelo 1 (variáveis veículo, bordo, raio e inclinação da rampa).

Tipo Veículo (Bordo)	Modelo	Coefficiente de Determinação (R <sup>2</sup> )
ART4 (BI)	$V_{85p} = 77,23 + 0,0098 \times R + 0,072 \times I$	0,462
ART4 (BE)	$V_{85p} = 77,03 + 0,0098 \times R + 0,072 \times I$	
ART5 (BI)	$V_{85p} = 74,49 + 0,0098 \times R + 0,072 \times I$	
ART5 (BE)	$V_{85p} = 74,30 + 0,0098 \times R + 0,072 \times I$	
ART6 (BI)	$V_{85p} = 71,74 + 0,0098 \times R + 0,072 \times I$	
ART6 (BE)	$V_{85p} = 71,54 + 0,0098 \times R + 0,072 \times I$	
TB2 (BI)	$V_{85p} = 82,64 + 0,0098 \times R + 0,072 \times I$	
TB2 (BE)	$V_{85p} = 82,44 + 0,0098 \times R + 0,072 \times I$	
TB3 (BI)	$V_{85p} = 78,14 + 0,0098 \times R + 0,072 \times I$	
TB3 (BE)	$V_{85p} = 77,94 + 0,0098 \times R + 0,072 \times I$	
<b>p-valor</b>		
0,002(TV)    0,912(B)	< 0,001 (β <sub>0</sub> )    < 0,001(R)	0,024(I)    -

**Tabela 2:** Modelo 2 (variáveis veículo, raio e inclinação da rampa).

Tipo Veículo	Modelo	Coefficiente de Determinação (R <sup>2</sup> )
ART4	$V_{85p} = 77,13 + 0,0098 \times R + 0,0724 \times I$	0,462
ART5	$V_{85p} = 74,40 + 0,0098 \times R + 0,0724 \times I$	
ART6	$V_{85p} = 71,64 + 0,0098 \times R + 0,0724 \times I$	
TB2	$V_{85p} = 82,54 + 0,0098 \times R + 0,0724 \times I$	
TB3	$V_{85p} = 78,04 + 0,0098 \times R + 0,0724 \times I$	
<b>p-valor</b>		
0,002	< 0,001 (β <sub>0</sub> )    < 0,001(R)	0,013(I)    -

**Tabela 3:** Modelo 3 (variáveis veículo, inverso do raio e inclinação da rampa).

Tipo Veículo	Modelo	Coefficiente de Determinação (R <sup>2</sup> )
ART4	$V_{85p} = 86,77 + 1303 \times \frac{1}{R} + 0,0724 \times I$	0,4082
ART5	$V_{85p} = 84,04 + 1303 \times \frac{1}{R} + 0,0724 \times I$	
ART6	$V_{85p} = 81,28 + 1303 \times \frac{1}{R} + 0,0724 \times I$	
TB2	$V_{85p} = 92,18 + 1303 \times \frac{1}{R} + 0,0724 \times I$	
TB3	$V_{85p} = 87,68 + 1303 \times \frac{1}{R} + 0,0724 \times I$	
<b>p-valor</b>		
0,003	< 0,001 (β <sub>0</sub> )    0,001(R)	0,017(I)    -

**Tabela 4:** Modelo 4 - em nível:  $-2\% \leq i \leq +2\%$  (variáveis veículo e raio).

Tipo Veículo	Modelo	Coefficiente de Determinação (R <sup>2</sup> )
ART4	$V_{85p} = 81,10 + 0,00823 \times R$	0,6112
ART5	$V_{85p} = 77,80 + 0,00823 \times R$	
ART6	$V_{85p} = 75,90 + 0,00823 \times R$	
TB2	$V_{85p} = 88,93 + 0,00823 \times R$	
TB3	$V_{85p} = 81,72 + 0,00823 \times R$	
<b>p-valor</b>		
0,001	< 0,001 (β <sub>0</sub> )	0,003(R)    -



**Tabela 5: Modelo 5 - aclave:  $i > +2\%$  (variáveis veículo e raio).**

Tipo Veículo	Modelo	Coefficiente de Determinação ( $R^2$ )
ART4	$V_{85p} = 67,25 + 0,01809 \times R$	0,8485
ART5	$V_{85p} = 61,69 + 0,01809 \times R$	
ART6	$V_{85p} = 60,55 + 0,01809 \times R$	
TB2	$V_{85p} = 72,74 + 0,01809 \times R$	
TB3	$V_{85p} = 69,61 + 0,01809 \times R$	
<b>p-valor</b>		
0,040	< 0,001 ( $\beta_0$ )	< 0,001(R)

**Tabela 6: Modelo 6 - declive:  $i < -2\%$  (variáveis veículo e raio).**

Tipo Veículo	Modelo	Coefficiente de Determinação ( $R^2$ )
ART4	$V_{85p} = 77,94 + 0,0067 \times R$	0,3899
ART5	$V_{85p} = 79,17 + 0,0067 \times R$	
ART6	$V_{85p} = 73,10 + 0,0067 \times R$	
TB2	$V_{85p} = 78,43 + 0,0067 \times R$	
TB3	$V_{85p} = 77,99 + 0,0067 \times R$	
<b>p-valor</b>		
0,671	< 0,001 ( $\beta_0$ )	0,101(R)

Onde:  $V_{85p}$  = velocidade operacional potencial [km/h]; R = raio da curva [m]; I = declividade longitudinal; BE = bordo externo; BI = bordo interno; TV = tipo de veículo.

Inicialmente foi estimado um modelo utilizando todas as variáveis independentes (modelo 1), incluindo a inclinação longitudinal. Porém, algumas variáveis não apresentaram resultados estatisticamente significativos para o nível de significância de 5%.

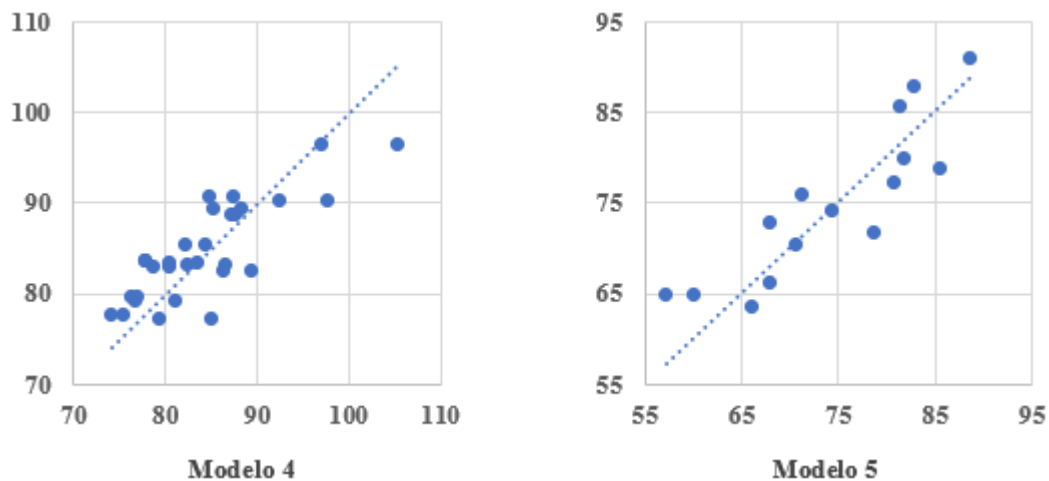
Para o modelo 2, foi eliminada a variável bordo. Esse se mostrou estatisticamente válido, apresentando coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,462, igual ao do modelo 1. No modelo 3, a variável planimétrica utilizada foi o inverso do raio. Este modelo também se mostrou estatisticamente válido, porém o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,4082 foi menor do que o do modelo 2.

Foram gerados modelos parciais para os três níveis de intervalos de rampa, os modelos 4, 5 e 6. Os modelos 4 e 5 atenderam a todos os critérios: (i) variáveis significativas para o nível de significância de 5%, (ii)  $R^2$  aceitáveis e maiores que os demais modelos, 0,6112 e 0,8485, respectivamente; (iii) resíduos bem distribuídos e (iv) modelo estatisticamente significativo.

Analisando os modelos parciais 5 e 6, é possível comparar os comportamentos dos condutores em aclave e declive. Os coeficientes de determinação  $R^2$  são 0,8485 (modelo 5) e 0,3899 (modelo 6), caracterizando, assim, que a variabilidade da velocidade operacional dos veículos de carga em aclave é menor e o modelo 5 tem uma melhor capacidade de estimativa.

De forma a validar os modelos 4 e 5, que obtiveram os maiores valores de  $R^2$ , foram aplicadas as equações de cada modelo para estimar a velocidade operacional e comparar com os valores observados conjunto de dados da amostra destinada à validação.

Analisando os gráficos da Figura 4, fica evidente que existem tanto valores acima da linha como abaixo, indicando uma dispersão aleatória e não tendenciosa.



**Figura 4:** Valores Observados x Estimados para os modelos 4 e 5.

O formato dos *boxplot* dos valores observados e estimados da Figura 5a são muito próximos nos valores das médias e nos quartis, o que indica uma boa capacidade de explicação do modelo. Percebe-se que valores menores de velocidade, o modelo não tem condições de capturar. A Figura 5b apresenta o *boxplot* das diferenças do modelo 4 (em nível). É possível perceber que o valor médio da diferença está próximo de zero, o que indica um bom ajuste. Percebe-se, também, que os principais quartis da distribuição apresentam limites próximos a 2 km/h.



**Figura 5:** *Boxplot* modelo 4 (em nível).

O gráfico *boxplot* (Figura 6a) apresenta valores estimados próximos dos valores observados, e o gráfico *boxplot* das diferenças (Figura 6b) possui média próxima a zero e quartis positivos e negativos



**Figura 6:** *Boxplot* modelo 5 (em active).

De maneira geral, todos os modelos estimados apresentaram valores do coeficiente de determinação acima de 0,38, o que indica que são bons modelos comportamentais (GARCIA,

2002). Analisando os valores dos coeficientes lineares dos modelos, é possível identificar padrões de comportamento do condutor quanto a velocidade esperada. Ao analisar os coeficientes lineares de todos os modelos gerados, é possível perceber que a velocidade operacional estimada é maior para os veículos menores (TB2 e TB3) em comparação com os de maior porte (ART4, ART5 e ART6).

Somente no modelo 1 foi possível analisar o comportamento em relação ao bordo, e caso o nível de significância fosse menor, essa variável poderia indicar que os veículos que trafegam no bordo interno são mais rápidos dos que trafegam no bordo externo. Isso demonstraria que ao trafegar no bordo interno, o condutor sente maior segurança para conduzir em maiores velocidades.

## 5. CONCLUSÕES

Conhecer o perfil da velocidade operacional ao longo de segmentos de uma via é de grande importância para diferentes análises que envolvam o desempenho dos veículos no fluxo de tráfego. A velocidade operacional é um parâmetro de resposta dos condutores, por esse motivo tal dado não é conhecido no momento da elaboração do projeto. Sendo assim a velocidade operacional estimada por modelos se torna essencial e tem diferentes aplicações. Entre elas destacam-se: (i) uso na análise da consistência geométrica; (ii) como input de softwares de modelagem de tráfego e (iii) em estudos para a definição da velocidade limite.

Pesquisas que ampliem o conhecimento sobre o real desempenho dos veículos de carga em rodovias de pista simples no que tange a velocidade operacional, são de grande importância para estudos de segurança viária. Especialmente em cenário como o brasileiro, onde a maioria das rodovias são de pista simples com a presença de elevado transporte de cargas no modo rodoviário. Além disso, estes veículos apresentam grande variedade de tipos com impacto diferente no desempenho da rede viária.

Nesse contexto, o presente trabalho se propôs a medir a velocidade operacional dos veículos de carga que trafegam por rodovias de pista simples em condições de fluxo livre para trajetos em curva, considerando separadamente dados da parte externa e interna da curva. Com base nessas medições foi possível desenvolver modelos de estimativa da velocidade operacional segundo características geométricas da via para diferentes tipologias de veículos de carga, atendendo-se assim ao objetivo geral deste estudo.

Os resultados obtidos confirmaram a capacidade do modelo estimado em explicar o comportamento da velocidade operacional para diferentes tipos de veículos de carga. O presente trabalho estudou dados para sete tipos diferentes de veículos de carga, sendo que para cinco foram obtidos modelos com boa capacidade explicativa.

Como principais contribuições do trabalho têm-se: (i) Identificação de diferentes padrões de comportamento quanto a velocidade operacional: a velocidade operacional dos veículos de carga em trajetória do lado externo das curvas tende a ser menor que do lado interno; a velocidade operacional varia conforme o tipo de veículo de carga, sendo maior para os veículos de menor porte em relação aos de maior porte; (ii) Importância da inclinação longitudinal para os veículos de carga: a velocidade operacional dos veículos de carga altera significativamente conforme a variação da inclinação, sendo maior em nível do que em aclive; (iii) Intervalo de validade dos modelos: os modelos estimados possuem validade para intervalos entre 140 e 1000

metros para o raio e 0% e +/- 5% para rampas; (iv) Coeficientes de determinação: para aclive, foi obtido modelo com coeficiente de determinação  $R^2=0,8485$  e para nível, o coeficiente foi de  $R^2=0,6112$ . Portanto, o modelo para aclive se mostrou mais robusto; (v) Variabilidade maior para as velocidades operacionais em declive: provavelmente em decorrência do padrão de condução dos condutores do tipo “banguela” e possivelmente pelo fato dos veículos de carga estarem ou não carregados.

A modelagem da velocidade operacional de diferentes tipologias de veículos de carga se constitui na principal contribuição do presente estudo. Tais modelos tem aplicação direta em estudos sobre Segurança Viária e de micro simulação, sendo, portanto, relevantes no avanço de pesquisas nessas áreas do conhecimento.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Castro, M., Sánchez, J. A., Vaquero, C. M., Iglesias, L., e Rodríguez-Solano, R. (2008) Automated GIS-based system for speed estimation and highway safety evaluation. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 22(5), 325–331. doi:10.1061/(ASCE)0887-3801(2008)22:5(325)
- DER/SP (2006) Notas técnicas de projeto geométrico. São Paulo.
- Echaveguren, T., e Díaz, Á. (2013) Operating speed profiles for single horizontal curves (Perfiles de velocidad de operacion para curvas horizontales aisladas). XVI Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte. Santiago.
- FHWA (2007) Mitigation Strategies for Design Exceptions Report No FHWA-SA-07-011. Obtido de <https://safety.fhwa.dot.gov/geometric/pubs/mitigationstrategies/>
- Fitzpatrick, K., Carlson, P., Brewer, M. A., Wooldridge, M. D., e Miaou, S. P. (2003) Design Speed, Operating Speed and Posted Speed Practices. Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C.
- Garber, N. J., e Ehrhart, A. A. (2000) Effect of speed, flow, and geometric characteristics on crash frequency for two-lane highways. *Transportation Research Record*, 1717(1717), 76–83. doi:10.3141/1717-10
- García, D. S. P. (2002) Elaboração de modelo de previsão da velocidade operacional e classificação de rodovias do estado do Rio Grande do Sul quanto a sua consistência geométrica. Univesidade Federal do Rio Grande do Sul.
- ITE (1994) Manual of transportation engineering studies. Prentice-Hall. Obtido de <http://choicereviews.org/review/10.5860/CHOICE.31-6073>
- Laboratório de Transportes – LabTrans. (2008) Análise e tratamento estatístico dos resultados de contagens de tráfego.
- Lamm, R., Guenther, A. K., e Choueiri, E. M. (1995) Safety module for highway geometric design. *Transportation Research Record*, (1512), 7–15.
- Llopis-Castelló, D., González-Hernández, B., Pérez-Zuriaga, A. M., e García, A. (2018) Speed Prediction Models for Trucks on Horizontal Curves of Two-Lane Rural Roads. *Transportation Research Record*, 2672(17), 72–82. doi:10.1177/0361198118776111
- MetroCount. (2019) ARX. Obtido 11 de agosto de 2019, de <http://mtehelp.tech-metrocount.com/Article.aspx?id=DB9FE70AC7>
- Nodari, C. T. (2003) Método de avaliação da segurança potencial de segmentos rodoviários rurais de pista simples. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Peng, Y., Geedipally, S., e Lord, D. (2012) Effect of roadside features on single-vehicle roadway departure crashes on rural two-lane roads. *Transportation Research Record*, (2309), 21–29. doi:10.3141/2309-03
- Torres, A. L. M. (2015) Análise de consistência de traçado de uma rodovia de múltiplas faixas. Universidade de São Paulo, São Paulo.
- WHO (2018) Global status report on road safety 2018. Genebra. Obtido de [https://www.who.int/violence\\_injury\\_prevention/road\\_safety\\_status/2018/en/](https://www.who.int/violence_injury_prevention/road_safety_status/2018/en/)

Zélia Silveira d’Azevedo (zelia.dazevedo@gmail.com)

Christine Tessele Nodari (piti@producao.ufrgs.br)

Daniel Sergio Presta Garcia (daniel.garcia@ufrgs.br)

Sander Fraga Farinha da Silva (sanderfraga@hotmail.com)

Laboratório de Sistemas de Transportes – Departamento de Engenharia de Produção e Transportes

Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS

Av. Osvaldo Aranha, 99 – Porto Alegre, RS, Brasil.