

# **MODELO DE REDES NEURAIS ARTIFICIAIS PARA PREVISÃO DA VELOCIDADE OPERACIONAL EM CURVAS DE RODOVIAS DE PISTA SIMPLES**

**Charlie Williams Rengifo Bocanegra**

**Daniel Sergio Presta García**

**Luis Antonio Lindau**

**João Fortini Albano**

Laboratório de Sistemas de Transportes – LASTRAN

Escola de Engenharia – EE/UFRGS

## **RESUMO**

Modelos para previsão da velocidade operacional em rodovias de pista simples tendem a empregar análise de regressão linear ou múltipla baseadas em processos econométricos. A maioria dos modelos, considerados estatisticamente válidos, apresenta uma única variável independente, o raio planimétrico. Os demais elementos geométricos quando inseridos no modelo, apesar de contribuírem com um acréscimo no coeficiente de determinação ( $R^2$ ), tornam o modelo estatisticamente inválido. O uso de Redes Neurais Artificiais (RNA), uma ferramenta efetiva na solução de problemas não lineares, permitiu o desenvolvimento de dois modelos de previsão da velocidade operacional, um para todos os tipos de veículos e outro para veículos de passeio, a partir de elementos geométricos como raio planimétrico, rampa, lado da curva, largura da pista e superelevação. Como resultado, obteve-se Erro Relativo Absoluto Médio (ERAM) menor de 0,07 e coeficiente de determinação da ordem de 0,61.

## **ABSTRACT**

Forecast models for operational speed in two-lane highways tend to use linear or multiple regression analysis which in turn are based upon econometric processes. The majority of these models reported as valid present only one independent variable, the planimetric radius. Others geometric elements inserted in the model, although improving the determination coefficient ( $R^2$ ), generate a statistically not valid condition. The use of Artificial Neural Networks (ANN), an effective tool to solve non linear problems, enabled the development of two forecast models for operational speed, one for all type of vehicles and the other just for automobiles, considering geometric elements like planimetric radius, ramp, curve side, road width and superelevation. The models provided a Mean Absolute Relative Error (MARE) lower than 0,07 and a determination coefficient of around 0,61.

## **1. INTRODUÇÃO**

A cada ano, mais de 500.000 pessoas vêm a falecer em acidentes de trânsito no mundo (Gibreel *et al.*, 1999). Estes valores são equivalentes a um óbito por minuto. No Brasil as estatísticas são imprecisas, mas a maior parte dos pesquisadores trabalha com valores entre 30.000 e 50.000 mortos por ano (Vieira, 1999).

Segundo Gibreel *et al.*(1999), mais de 50% das fatalidades em rodovias ocorrem em segmentos de curvas. Dados levantados na Dinamarca indicam que 20% dos acidentes viários e 13% das mortes ocorrem em segmentos de curvas de rodovias rurais. Na França, as fatalidades em segmentos de curva de rodovias rurais chegam a 20% (Herrstedt e Greibe, 2001).

Uma análise mais abrangente, como a proposta por Lum e Reagan (1995), tenta identificar os comportamentos associados entre os diferentes agentes (condutor, rodovia e veículo) entre si. Estas inter-relações, segundo estudos realizados nos Estados Unidos e Grã-Bretanha, são responsáveis por 38% dos acidentes em rodovias. Além disso, esta análise estabelece uma relação entre as características geométricas da rodovia, a velocidade operacional e a taxa de acidentes.

Deste modo, o presente trabalho tem por objetivo ampliar estudos anteriores, de forma a elaborar modelos de estimativa da velocidade operacional em curvas em função de elementos

geométricos de rodovias de pista simples. Para tanto, utilizou-se Redes Neurais Artificiais (RNA) por sua capacidade de solução de problemas não lineares.

## 2. ESTUDOS SOBRE A VELOCIDADE

### 2.1. A Velocidade Como Fator Causal de Acidentes

A velocidade é uma resultante direta da relação condutor, veículo e rodovia. É por este motivo que a velocidade de projeto (diretriz) é utilizada no dimensionamento de diferentes dispositivos viários, como a superelevação, a superlargura e as distâncias de visibilidade.

Segundo o Manual de Projeto Geométrico de Rodovias Rurais (DNER, 1999), "velocidades diretrizes elevadas, por mais desejáveis que sejam, requerem características geométricas mais amplas [...] que elevarão o custo de construção substancialmente". Por outro lado, a velocidade diretriz não deve ser inferior às velocidades de operação que efetivamente ocorrem na via. Na prática, a velocidade efetivamente observada em veículos em um determinado trecho viário, pode ser representada pelo percentil 85 (V85) da distribuição de velocidades.

Diferentes estudos indicam uma relação de causa e efeito entre a velocidade, a ocorrência de acidentes e a gravidade dos mesmos. 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 apresentavam modelos para estimativa da velocidade operacional e taxa de acidentes em função da taxa angular de curvatura e da largura da pista. A Tabela 1 apresenta as relações de causa e efeito citadas.

**Tabela 1** – Modelos de Estimativa da Velocidade Operacional e da Taxa de Acidentes para Rodovias de Pista Simples da Alemanha e Estados Unidos

País	Modelo	Largura da Pista [pés]	Modelo	Coefficiente de Determinação R <sup>2</sup>	Equação
Alemanha	V85	12 (3,7 m)	$V85 = 37,50 + 24,81 \times e^{(-0,145 \times DC)}$	-	(1)
		10 (3,0 m)	$V85 = 37,50 + 23,03 \times e^{(-0,190 \times DC)}$	-	(2)
	ACCR	≥11 (3,4 m)	$ACCR = -0,29 + 0,37 \times DC$	0,33	(3)
		<11 (3,4 m)	$ACCR = -0,50 + 0,55 \times DC$	0,35	(4)
Estados Unidos	V85	12 (3,7 m)	$V85 = 59,75 - 1,00 \times DC$	0,82	(5)
		10 (3,0 m)	$V85 = 55,65 - 1,02 \times DC$	0,75	(6)
	ACCR	12 (3,7 m)	$ACCR = -0,55 + 1,08 \times DC$	0,73	(7)
		10 (3,0 m)	$ACCR = -1,02 + 1,51 \times DC$	0,30	(8)

Fonte: Lamm *et al.*, 1995

em que V85: estimativa da velocidade operacional [milhas/h];  
ACCR: estimativa da taxa de acidentes [acidentes/10<sup>6</sup> veículos-milha];  
DC: taxa angular de curvatura [ ° / 100 pés] para o intervalo de 0° a 25°.

Entre 1973 e 1974, os Estados Unidos apresentaram um declínio de 34% nas taxas de fatalidades em rodovias rurais interestaduais. Este fato coincidiu com o embargo do óleo árabe e conseqüente redução do limite de velocidade de 70 para 55 milhas por hora. Outros aspectos que poderiam contribuir para esta significativa redução na taxa de acidentes, como a renovação da frota, ou alterações nos projetos viários, não aconteceram no período. A significativa queda das mortes em função da redução do limite de velocidade, embora os

preços do petróleo tenham declinado rapidamente após 1974, fez com que este limite fosse mantido até 1987, por ter sido considerado uma medida efetiva de segurança.

Estudos mais recentes, como o de Lave e Elias (1994), questionam a relação formulada acima, indicando em seus modelos uma redução entre 3,4% e 5,1% para a taxa de fatalidade em rodovias de Estados com o novo limite de velocidade de 65 milhas por hora, se comparadas a de Estados que mantiveram o limite anterior de 55 milhas por hora. Já Rock (1995), em trabalho realizado sobre rodovias do Estado de Illinois, Estados Unidos, no período de 5 anos anterior à alteração do limite de velocidade de 55 para 65 milhas por hora e 4 anos posterior a mesma, considera que a elevação do limite de velocidade foi responsável pelo incremento em mais de 300 acidentes por mês nas rodovias do Estado.

Hunter *et al.* (2000) em seus estudos sobre acidentes em rodovias de pista simples na Carolina do Norte, Estados Unidos, entre 1994 e 1999, obtiveram os seguintes resultados:

- 44% dos acidentes relacionados à velocidade ocorreram em rodovias secundárias com características geométricas inferiores às demais rodovias;
- Acidentes relacionados à velocidade ocorrem, *geralmente*, em segmentos de curvas.

A utilização de modelos de estimativa que relacionam a velocidade operacional das vias a suas condições geométricas pode, em parte, responder questões associadas ao excesso de velocidade, ao comportamento do motorista e à ocorrência de acidentes.

## **2.2. Modelos de Estimativa da Velocidade Operacional**

### **2.2.1. Modelo de Lamm et al. (1990)**

O modelo proposto por Lamm *et al.* (1990), e também citado por Tarris *et al.* (1996) resulta de estudos realizados no período entre a primavera de 1984 e o verão de 1987 em rodovias de pista simples no estado de Nova Iorque, Estados Unidos.

A base de dados foi constituída de 322 segmentos de curvas de diversos tamanhos de raio. Estes segmentos de curva deveriam obedecer alguns critérios pré-definidos; entre estes, pode-se citar a inexistência da influência de interseções, greides (aclives e declives) iguais ou inferiores a 5% e tráfego médio diário anual (AADT) entre 400 e 5000 veículos por dia. A condição de fluxo livre foi obtida considerando, para efeito de medição da velocidade pontual, apenas os veículos com um *gap* mínimo superior a 6 segundos entre si.

Em seus estudos para a determinação de um modelo para a velocidade operacional, foram consideradas as seguintes características das vias como variáveis independentes: taxa angular de curvatura, largura da pista, largura do acostamento, declividade longitudinal (rampa), distância de visibilidade, comprimento da curva e tráfego médio diário anual.

A Equação 9 indica a relação entre a velocidade operacional e o raio planimétrico, com coeficiente de determinação igual a 0,787.

$$V_{85} = 94,398 - \frac{3188,656}{R} \quad (9)$$

em que     $V_{85}$ : velocidade operacional [km/h];  
             $R$ :     raio da curva [m].

Entre as diferentes variáveis independentes utilizadas, Lamm *et al.* (1990) concluíram que parâmetros como declividade longitudinal, distância de visibilidade e comprimento da curva não agregam qualidade ao modelo proposto. Os elementos largura da pista, largura do acostamento e o tráfego médio diário anual, utilizados na elaboração de um modelo mais

complexo, também não apresentaram resultados significativos, sendo descartados.

### 2.2.2. Modelo de Kanellaidis et al. (1990)

No mesmo ano dos estudos de Lamm, Kanellaidis *et al.* (1990) apresentam artigo propondo quatro distintos modelos relacionando a velocidade operacional a características planimétricas da via e à velocidade de projeto. Seus estudos foram baseados em dados levantados em 58 segmentos de curvas de 3 rodovias de pista simples situadas na Grécia.

As condições básicas dos trechos considerados foram: inexistência de interseções próximas aos segmentos estudados, inexistência de objetos adjacentes à via que ocasionem restrição à utilização da mesma, greides (ascendentes ou descendentes) não superiores a 3%, nenhuma alteração nas larguras da pista e dos acostamentos e boas condições de pavimento.

Os elementos geométricos analisados foram: raio da curva, comprimento da curva, superelevação, declividade longitudinal, largura da pista e largura do acostamento.

As velocidades pontuais foram colhidas em segmentos de curvas e retas apenas de veículos de passeio. Veículos de carga e ônibus não fizeram parte do fluxo de tráfego na obtenção das velocidades operacionais. O modelo decorrente do estudo de Kanellaidis *et al.* (1990) possui um coeficiente de determinação de 0,647 e é apresentado na Equação 10.

$$V_{85} = 109,085 - \frac{3837,554}{R} \quad (10)$$

em que  $V_{85}$ : velocidade operacional [km/h];  
R: raio da curva [m].

Kanellaidis *et al.* (1990) concluem que a velocidade de projeto e a taxa angular de curvatura (ou raio) são os principais elementos determinantes da velocidade operacional. Os demais parâmetros planimétricos investigados (comprimento da curva, superelevação, rampa, largura da pista e do acostamento) não apresentaram efeitos estatísticos significativos.

### 2.2.3. Modelos Propostos Pela Federal Highway Administration (FHWA, 2000)

A Federal Highway Administration (FHWA, 2000) apresenta uma série de modelos de predição da velocidade operacional. Entre estes modelos, gerados a partir de dados coletados em mais de 200 segmentos de rodovias de pista simples, quatro estimam a velocidade operacional em função do raio planimétrico para um intervalo de rampa.

A análise dos modelos propostos permitiu a observação dos seguintes fatos:

- A velocidade operacional em curvas horizontais com grandes raios (acima de 800 metros) é similar à praticada em longas tangentes;
- A velocidade operacional sofre significativa redução em raios inferiores a 250 metros;
- A análise em curvas com transição identificou que a utilização de espirais não altera de forma significativa a velocidade operacional em comparação a curvas circulares.

A Tabela 2 apresenta os modelos com seus respectivos coeficientes de determinação.

**Tabela 2** – Modelos V85 Função Raio Planimétrico e Rampa, segundo FHWA (2000)

Rampa	Modelo	R <sup>2</sup>	Equação
-9% ≤ i < -4%	$V_{85} = 102,10 - 3077,13/R$	0,58	(11)
-4% ≤ i < 0%	$V_{85} = 105,98 - 3709,90/R$	0,76	(12)
0% ≤ i < 4%	$V_{85} = 104,82 - 3574,51/R$	0,76	(13)
4% ≤ i < 9%	$V_{85} = 96,61 - 2752,19/R$	0,53	(14)

em que V85: velocidade operacional [km/h];  
R: raio da curva [m].

#### 2.2.4. Outros Modelos

Em Kansas (EUA), Najjar *et al.* (2000) usaram as RNA para estimar a velocidade do percentil 85, usado como base para configurar as velocidades limites em rodovias rurais de dois faixas.

García e Albano (2003), utilizando a mesma base de dados do presente artigo, apresentam um modelo econométrico, de regressão linear simples e forma funcional inversa, conforme Equação 15.

$$V85 = 90,785 - \frac{1975,105}{R} \quad (15)$$

em que V85: velocidade operacional [km/h];  
R: raio da curva [m].

O modelo, além de apresentar um coeficiente de determinação satisfatório para um modelo comportamental ( $R^2 = 0,5874$ ) e de ser estatisticamente válido, não apresenta resíduos com padrão de variação em função da variável independente raio.

### 3. MÉTODO

Apresenta-se, neste item, um resumo da abordagem adotada na definição do modelo de RNA para determinar a velocidade operacional de curvas a partir de características geométricas das rodovias de pista simples. A seguir, são discriminados a base de dados do estudo e o desenvolvimento do modelo de RNA.

#### 3.1. Base de Dados do Estudo

A elaboração de um modelo de previsão da velocidade operacional em curvas, a partir de elementos geométricos de rodovias de pista simples do Estado do Rio Grande do Sul, respeitou uma série de critérios a seguir relacionados.

##### 3.1.1. Identificação do Intervalo da Amostra

Foram analisadas 60 curvas, medidas nos dois sentidos (lado externo e lado interno de cada curva), totalizando 120 sítios, com intervalo de raios planimétricos entre 50 e 1000 metros e rampas entre -8% e 8%.

##### 3.1.2. Determinação do Tamanho da Amostra por Curva

Para um desvio padrão de 8,5 km/h, valor atribuído a rodovias de pista simples (Box e Oppenlander, 1976), um nível de confiança de 95% ( $K = 1,96$ ), um erro admissível para a estimativa de 4 km/h e uma constante de correção para 85 percentil ( $U = 1,04$ ), obteve-se um tamanho de amostra mínima de 27 dados de velocidade pontual por sítio, ou seja, para efeitos estatísticos, um mínimo de 30 dados por sítio.

##### 3.1.3. Representatividade da Amostra

Outra preocupação quanto ao tamanho da amostra foi a de representar a população de veículos que trafegam nos sítios analisados. O levantamento de velocidades pontuais considerou a divisão do fluxo de veículos entre veículos de passeio, caminhões e ônibus. A velocidade operacional foi obtida a partir dos veículos de passeio ( $V85_{\text{Passeio}}$ ) e do total de veículos ( $V85_{\text{Total}}$ ) a partir da percentagem de contribuição dos diferentes tipos de veículos no fluxo da rodovia.

### 3.1.4. Método para Coleta de Dados de Velocidade Pontual

O Método das Bases Longas, CET (1982), para obtenção de velocidades pontuais foi o escolhido, em função do fácil acesso aos equipamentos necessários e da simplicidade de operação.

### 3.1.5. Método para Coleta de Dados Topográficos

A identificação dos principais elementos característicos das curvas (raio planimétrico, rampa, largura da pista e superelevação) foi obtida através de levantamento topográfico. O método de levantamento utilizado é denominado de Levantamento Taqueométrico, e sua escolha decorreu do fato deste método exigir uma equipe mínima formada por apenas dois indivíduos.

### 3.1.6. Considerações Sobre os Segmentos em Estudo

A elaboração de um modelo velocidade operacional função de parâmetros geométricos de rodovias de pista simples deve eliminar ou reduzir a interferência de outros fatores alheios à pesquisa. Desta forma, estabeleceram-se condicionantes para a seleção dos segmentos, como, por exemplo: condicionantes de fluxo livre, intertangente mínima, inexistência de interseções próximas, inexistência de objetos adjacentes à via, pavimento e climáticas.

### 3.1.7. Dados Sobre as Rodovias do Estudo

O presente estudo foi desenvolvido utilizando quatro rodovias cadastradas no Sistema Rodoviário do Estado do Rio Grande do Sul (SRE, 2000). Tais rodovias possuem como características comuns pista simples, Nível de Serviço superior ou equivalente ao Nível C (velocidade média igual ou próxima à velocidade de fluxo livre) e respeitam os critérios relatados nos itens 3.1.1. a 3.1.6. As rodovias selecionadas constam na Tabela 2.

**Tabela 2 – Características das rodovias**

Rodovia	Região	VDM	Composição de Veículos		
			Passeio	Carga	Ônibus
RS/020	Ondulada	3022	72%	24%	4%
RS/115	Montanhosa	7282	82%	14%	4%
BR/116	Escarpada	1464	75%	17%	8%
RS/040	Plana	3284	86%	12%	2%

Dos 120 sítios levantados, 26 foram descartadas por apresentarem problemas no tamanho da amostra ou na intertangente mínima, sendo aproveitados 30 dados para a RS/020, 19 para a RS/115, 22 para a BR/116 e 23 para a RS/040.

## 3.2. Desenvolvimento dos Modelos de Previsão da Velocidade Operacional

Para o desenvolvimento dos modelos de Redes Neurais Artificiais (RNA) de previsão da velocidade operacional, a partir das características geométricas de rodovias de pista simples, foi considerada a seguinte abordagem: 75% dos dados foram utilizados para realizar o treinamento (ou calibração) do modelo e com os dados restantes (25%) foi realizado o teste (ou validação).

Os conjuntos de teste serviram para comprovar o desempenho dos modelos, já que os dados desses conjuntos não entraram no processo de treinamento. O *software* de Redes Neurais Artificiais *BrainMaker Professional* (California Scientific Software, 1998), foi empregado para a modelagem. Este *software*, nos resultados, apresenta as medidas de desempenho necessárias para a escolha do melhor modelo, tais como o Erro Relativo Absoluto Médio (ERAM) e o Coeficiente de Determinação ( $R^2$ ).

Os elementos geométricos presentes na base de dados e considerados neste estudo, são

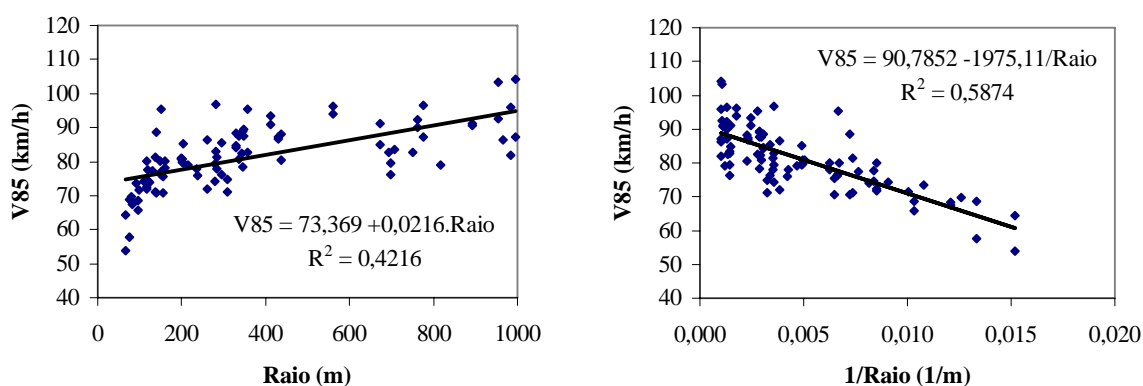
apresentadas a seguir:

- **Raio Planimétrico** com valores entre 65,77 e 995,40 m;
- **Lado** interno (0) ou externo (1) da curva;
- **Rampa** ou Inclinação Longitudinal: entre -7,45% e 7,45%;
- **Largura da Pista**: entre 6,35m e 8,38m;
- **Superelevação**: entre 1,42% e 9,46%.

### 3.2.1. Análise das Relações Entre a Velocidade Operacional e os Elementos Geométricos

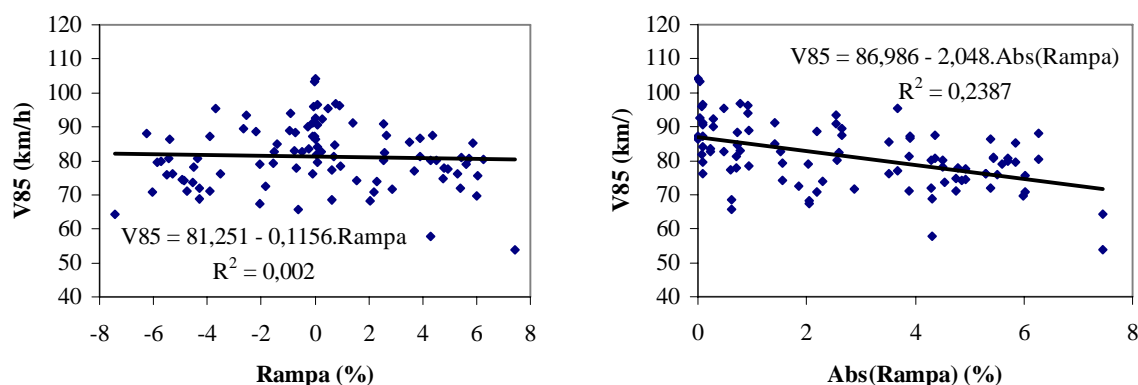
A elaboração dos modelos de previsão teve como etapa preliminar a identificação da variabilidade da velocidade operacional em função de cada um dos elementos geométricos considerados.

As equações 9 a 15 sugerem modelos de regressão linear baseados no raio planimétrico, apresentando a velocidade operacional como função inversa do raio. A Figura 1a indica em gráfico a relação direta entre a velocidade operacional e o raio, enquanto a Figura 1b apresenta a relação inversa. É perceptível, através das linhas de tendência, verificar o melhor ajuste da Figura 1b. Este fato é confirmado através do coeficiente de determinação maior da Figura 1b.



**FIGURA 1** – (1a) Velocidade operacional em função do raio planimétrico; (1b) Velocidade operacional em função inversa do raio planimétrico

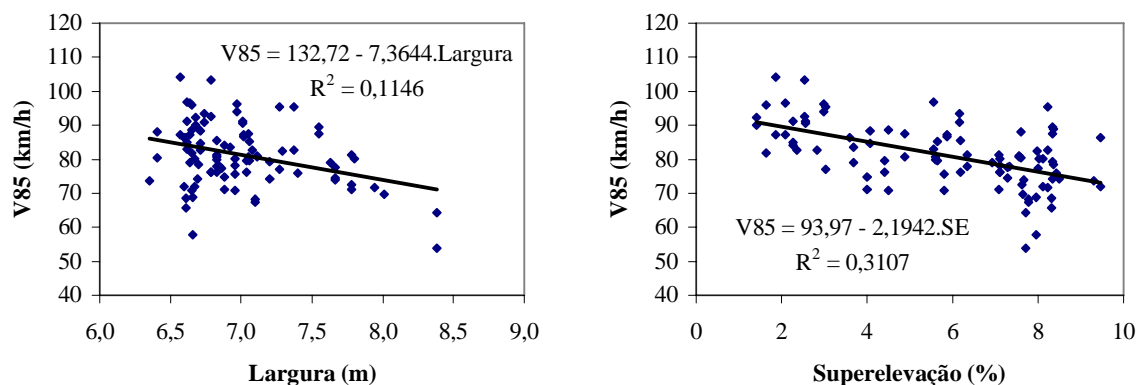
Os modelos propostos pela FHWA (2000) sugerem a interferência da inclinação da rampa na velocidade operacional. Analisando as equações 11 a 14 pode-se perceber que para um raio infinito, a velocidade operacional dos intervalos de rampa entre 0% e -4% e entre 0% e 4% é de 105,98 e 104,82 km/h, respectivamente, e que esta velocidade cai nos intervalos mais críticos de rampas ascendentes ou descendentes (96,61 e 102,10 km/h). Este comportamento caracteriza a variabilidade da velocidade como função dos valores absolutos da variabilidade da rampa. De fato, analisando a Figura 2, percebe-se a impossibilidade de explicar a variabilidade a partir da variável independente rampa, enquanto é possível perceber uma relação entre a variabilidade da velocidade operacional e os valores absolutos de rampas.



**FIGURA 2** – (2a) Velocidade operacional em função da rampa; (2b) Velocidade operacional em função do valor absoluto da rampa

No presente estudo não foi possível determinar uma forma funcional mais adequada ao modelo para as variáveis largura da pista e superelevação que a relação direta. A largura da pista está associada à classe de projeto, ou seja, à velocidade de projeto. Desta forma, quanto maior a velocidade de projeto, maior a largura da pista. Contudo, ao analisar-se a largura da pista em função do raio planimétrico, percebe-se que quanto menor o raio, maior a largura da pista, em decorrência do efeito de superlargura. O mesmo comportamento apresenta a superelevação. Da mesma forma o lado interno ou externo da curva não foi previamente submetido a análise do efeito sobre a velocidade operacional.

A Figura 3 apresenta os gráficos da velocidade operacional função largura da pista (Figura 3a) e função da superelevação (Figura 3b).



**FIGURA 3** – 3a Velocidade operacional em função da largura da pista; 3b Velocidade operacional em função da superelevação

Em face ao exposto, foram consideradas como variáveis de entrada para o desenvolvimento dos modelos de RNA, os seguintes elementos geométricos: (i) inverso do raio ( $1/R$ ), (ii) Lado (0-interno, 1-externo), (iii) valor absoluto da rampa ( $\text{abs}(I)$ ), (iv) Largura e (v) Superelevação.

Como variáveis de saída, foram adotadas as velocidades operacionais de (i) todos os tipos de veículos da rodovia ( $V85_{\text{Total}}$ ), conforme composição do tráfego da Tabela 2, e (ii) apenas os veículos de passeio ( $V85_{\text{Passeio}}$ ).

#### 4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste item são abordadas as medidas de desempenho encontradas nos melhores modelos de RNA desenvolvidos, além de uma análise comparativa entre os modelos desenvolvidos para os veículos de passeio e para todo o conjunto de veículos.

##### 4.1. Medidas de Desempenho

Após testar diferentes arquiteturas de RNA, verificou-se que os modelos com camada intermediária composta por 30 neurônios apresentam o melhor resultado. As medidas de desempenho dos melhores modelos constam na Tabela 3.

**Tabela 3** – Medidas de desempenho dos melhores modelos

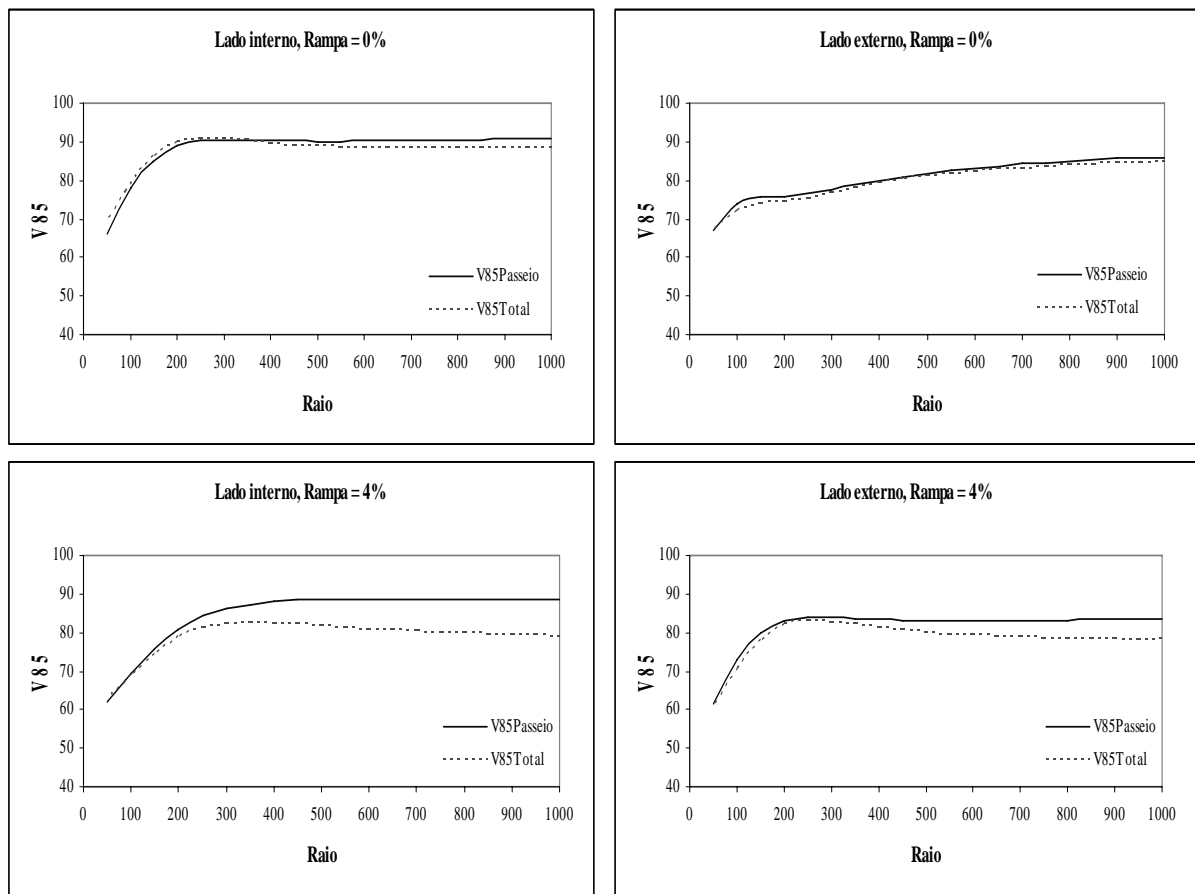
	Conjunto de Treinamento		Conjunto de Teste	
	R <sup>2</sup>	ERAM	R <sup>2</sup>	ERAM
V85Total	0,7131	0,046	0,6318	0,068
V85Passeio	0,6517	0,050	0,6112	0,070

Os resultados contidos na Tabela 3 mostram que a capacidade de generalização das RNA foi efetiva.

##### 4.2. Análise Comparativa dos Modelos

Para comparação dos modelos foi realizada uma análise de sensibilidade. Para tanto, procedeu-se a construção de gráficos do tipo V85 x Raio, para o intervalo de raios variando entre 50 e 1000 metros. Em cada gráfico foram “plotadas” duas curvas referentes ao V85Passeio e ao V85Total.

A Figura 4 apresenta quatro gráficos distintos conforme variação da rampa nos intervalos de 0% e 4% e do lado (interno ou externo). Os elementos geométricos superelevação e largura por apresentarem um grau de correlação alto com o raio (uma vez que na etapa de projeto os mesmos são definidos a partir deste) foram introduzidos no modelo, para a análise de sensibilidade, como resultantes das equações de projetos estabelecidas nas normas do DAER (1991).



**FIGURA 4** – V85Total e V85Passeio em função do raio para rampas de 0 e 4% e lado interno e externo da curva

As V85, conforme análise dos gráficos acima, apresentam valores a partir de 60 km/h para raios de 50 metros e rampas de 4% e de 65 km/h para as mesmas curvas em rampas próximas a 0%.

As V85 para grandes raios atingem valores próximos a 90 km/h para veículos de passeio nas curvas internas e, próximos a 80 km/h nas curvas externas. Já para todos os veículos é possível perceber que as V85 para grandes raios sofrem uma queda conforme rampa e lado, variando de 85 a 75 km/h. Em ambos os gráficos, podem-se perceber a maior variabilidade da V85 ocorrendo para raios inferiores a 300 metros.

A diferença absoluta entre a velocidade operacional do total dos veículos e dos veículos de passeio, na maior parte dos intervalos dos gráficos é bastante próxima, apresentando uma diferença mais significativa (aproximadamente 10 km/h) no gráfico para rampas de 4% e lado interno.

É possível perceber que a V85Total apresenta significativa redução quando passamos de uma rampa de 0% para 4% em ambos os lados da curva. Como os modelos gerados adotaram o valor absoluto da rampa este comportamento verifica-se também para o sentido negativo da mesma, ou seja, o modelo prevê a redução de velocidade ao passarmos de 0% para -4%. Esta tendência não se verifica para ambos os lados quando considerados apenas os veículos de passeio.

Não foi possível determinar os elementos envolvidos na redução da V85Total para o lado externo e rampa igual a 4% a partir de um ponto máximo próximo a um raio igual a 200 metros. Acredita-se que a curva apresentada no gráfico não reflita o comportamento verificado nas rodovias, podendo ser decorrente de interpolações por parte do modelo.

## **5. CONCLUSÕES**

Os modelos construídos através de RNA apresentaram bom desempenho reproduzindo de forma satisfatória a velocidade operacional em curvas de rodovias de pista simples para veículos de passeio e para todos os tipos de veículos. No entanto, verifica-se no modelo V85Total uma capacidade explicativa menor quando submetido a condições limites de raios (grandes raios) e rampas. Em comparação com o modelo de García e Albano (2003), obteve-se um ganho na capacidade explicativa do modelo, ampliando-se de 0,58 para 0,71 o coeficiente de determinação para o total de veículos.

A utilização das RNA permitiu desenvolver modelos mais robustos, considerando como variáveis um conjunto mais amplo de elementos geométricos, que apresentavam problemas de significância em modelos de regressão linear ou múltipla.

Através da análise de sensibilidade, sobre os modelos gerados, observa-se que para grandes raios e extensões em tangente, o modelo sugere uma velocidade operacional próxima a 90 km/h para os veículos de passeio. No outro extremo, para raios próximos a 50 metros, verifica-se que a velocidade operacional da totalidade de veículos é de 60 km/h, aproximadamente. Ainda, em rampas próximas a 0% o comportamento dos veículos de passeio assemelha-se ao de todos os veículos do fluxo. Somente em condições mais críticas de rampa ocorre o surgimento de diferenças maiores entre as velocidades operacionais dos diferentes tipos de veículos.

Foi constatada uma relação inversamente proporcional entre a rampa e a velocidade operacional. Este fato é mais significativo para raios menores a 500 metros (lado interno) e 300 metros (lado externo). Esta relação é válida tanto para os valores positivos de rampa (aclives) como negativos (declives).

A análise de sensibilidade dos modelos indicou, também, que as figuras correspondentes ao lado interno das curvas não apresentam a mesma forma funcional das figuras do lado externo, caracterizando como relevante a inclusão deste elemento, como variável, no modelo.

Os modelos propostos estão limitados a análise da velocidade operacional em curvas de rodovias de pista simples a partir dos seus elementos geométricos principais, não sendo considerados fatores humanos, dos veículos e do meio ambiente.

Futuros trabalhos poderão ser desenvolvidos de forma a utilizar o modelo proposto como uma ferramenta para a análise da consistência geométrica de rodovias.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- California Scientific Software (1998) Brainmaker Profissional: User's guide and reference. Nevada City.
- CET (1982) Capítulo 6 – Pesquisa de Velocidade Pontual – *Boletim Técnico Nº 31 da CET*, Companhia de Engenharia de Tráfego – São Paulo.
- DAER (1991) Normas de Projetos Rodoviários. *Secretaria dos Transportes – Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem*.
- DNER (1999) Manual de Projeto Geométrico de Rodovias Rurais. *Ministério dos Transportes – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – Diretoria de Desenvolvimento Tecnológico*.
- FHWA (2000) Evaluation of Design Consistency Methods for Two-Lane Rural Highways, Executive Summary. *Federal Highway Administration*, FHWA-RD-99-173(25):1-25.
- Garber, N. J. e A. A. Ehrhart (2000) The Effect of Speed, Flow, and Geometric Characteristics on Crash Rates for Different Types of Virginia Highways. *Virginia Department of Transportation and the University of Virginia*.
- Garcia, D. S. P. e J. F. Albano (2003) Modelo de Previsão da Velocidade Operacional a partir de Características Planimétricas de Rodovias. *Anais da 3ª Semana de Engenharia de Produção e Transportes*. Porto Alegre.
- Gibreel, G.M.; S.M. Easa; Y. Hassan e I.A. El-Dimeery (1999) State of the Art of Highway Geometric Design Consistency. *Journal of Transportation Engineering*, v.125, n.9, p.305-313.
- Herrstedt, L. e P. Greibe (2001) Safer Signing and Marking of Horizontal Curves on Rural Roads. *Traffic Engineering and Control*, v.42, n.3, p.82-87.
- Hunter, W. W.; J. R. Stewart e S. V. Heusen-Causey (2000) An Overview of Rural Speed Crashes in North Carolina – 1994-1999. *University of North Carolina – Highway Safety Research Center*.
- Kanellaidis, G.; J. Golias e S. Efstathiadis (1990) Drivers' Speed Behaviour on Rural Road Curves. *Traffic Engineering and Control*, v.31, n.7, p.414-415.
- Lamm, R.; E.M. Choueiri e T. Mailaender (1990) Comparison of Operating Speed on Dry and Wet Pavement of Two Lane Rural Highways. *Transportation Research Record* 1280, p.199-207.
- Lamm, R.; A.K. Guenther e E.M. Choueiri (1995) Safety Module for Highway Geometric Design. *Transportation Research Record* 1512, p.7-15.
- Lave, C. e P. Elias (1994) Did the 65 mph Speed Limit Save Lives? *Accident Analysis and Prevention*, v.26, n.1, p.49-62.
- Lum, H. e J. A. Reagan (1995) Interactive Highway Safety Design Model: Accident Predictive Module. *Public Roads*. Winter.
- Najjar, M.Y., R.W. Stokes, e E.R. Russell (2000) Setting speed limits on Kansas two-lanes highways: a Neuronet approach. *Anais do 79º Annual Meeting of Transportation Research Board* (em CD-ROM). TRB, Washington, D.C.
- Rock, S. M. (1995) Impact of the 65 mph Speed Limit on Accidents, Deaths, and Injuries in Illinois. *Accident Analysis and Prevention*, v.27, n.2, p.207-214.
- SRE (2000) Sistema Rodoviário do Estado do Rio Grande do Sul. *Secretaria dos Transportes – Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem – SPR*. Revisão Anual - 2000.
- Tarris, J.P.; C.M. Poe, J.M. Mason e K.G. Goulias (1996) Predicting Operating Speeds on Low-Speed Urban Streets: Regression and Panel Analysis Approaches. *Transportation Research Record* 1523, p.46-54.
- Vieira, H. (1999) Avaliação de Medidas de Contenção de Acidentes: Uma Abordagem Multidisciplinar. *Tese de Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC*.

## Endereço dos autores:

Charlie Williams Rengifo Bocanegra (charlie@producao.ufrgs.br)  
Daniel Sergio Presta García (daniel@cienge.com.br)  
Luis Antonio Lindau (lindau@producao.ufrgs.br)  
João Fortini Albano (jalbano@producao.ufrgs.br)

Laboratório de Sistemas de Transportes – LASTRAN  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Praça Argentina, 9 sala 408  
CEP 90040-020  
Porto Alegre – RS – Brasil