

ESTUDO DE PERFIS DE VARIAÇÃO DE VELOCIDADE DE VEÍCULOS LEVES EM CURVAS: AVALIAÇÃO DE PADRÕES E DA ADERÊNCIA A MODELOS EXISTENTES

Sander Fraga Farinha da Silva

Daniel Sergio Presta García

Zélia Silveira d'Azevedo

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

RESUMO

A redução de velocidade entre segmentos contíguos de uma rodovia tem forte influência na frequência de acidentes, e a avaliação da consistência geométrica é uma importante ferramenta para identificar locais propensos a situações perigosas. Este trabalho estuda dados observados em três curvas, analisando os padrões de comportamento dos condutores no que tange às taxas de desaceleração e aceleração praticadas. Sete modelos de previsão propostos na literatura são avaliados com o objetivo de determinar os que melhor se aderem aos dados observados em campo. A análise dos perfis de variação de velocidade permitiu identificar padrões similares de comportamento para ambos os sentidos, porém com diferenças importantes no que diz respeito às taxas praticadas. Os modelos de desaceleração propostos por Pérez-Zuriaga e de aceleração proposto por Bella apresentaram os menores erros quando comparados aos dados observados em campo.

ABSTRACT

Speed reduction between contiguous segments of a highway has a strong influence on the accident rate, and the evaluation of geometric consistency is an important tool to identify locations prone to risk situations. This work studies data observed in three curves, analyzing the behavior patterns of drivers regarding the deceleration and acceleration rates practiced. Seven prediction models proposed in the literature are evaluated with the objective of determining the ones that best adhere to the data observed in the field. The analysis of the speed variation profiles in the curves made possible to identify similar behavior patterns in both directions of the curves, but with important differences regarding the rates practiced. The deceleration models proposed by Pérez-Zuriaga in 2010 and the acceleration model proposed by Bella in 2014 presented the lowest errors when compared to the data observed in the field.

1. INTRODUÇÃO

A redução de velocidade entre segmentos contíguos de uma rodovia tem forte influência na frequência de acidentes (Fitzpatrick *et al.*, 2000), fato este que torna importante não apenas determinar a variação de velocidade entre dois pontos, mas também como e quando ela ocorre. Para evitar situações de risco, é importante que as características geométricas das rodovias não proporcionem aos condutores condições propícias a reduções bruscas de velocidade, o que pode ser verificado a partir da análise da consistência geométrica do traçado.

O conceito de consistência geométrica pode ser definido como a conformação dos elementos geométricos de uma rodovia às expectativas dos condutores (Ng e Sayed, 2004). Para d'Azevedo (2020), “um traçado é considerado não consistente se apresenta mudanças inesperadas que podem surpreender o condutor, levando a executar manobras que poderão ocasionar acidentes”. A análise do perfil de velocidade é considerada uma das melhores ferramentas de avaliação da consistência geométrica, permitindo identificar problemas como diferenças entre a velocidade operacional e a de projeto e variações repentinas de velocidade (García, 2008).

Para traçar adequadamente os perfis de velocidade em transições entre tangentes e curvas são necessários modelos que descrevam as taxas usuais de aceleração e desaceleração praticadas nestes locais (Altamira *et al.*, 2014), e ao longo do tempo foram desenvolvidos uma série de modelos com esta finalidade.

Os modelos existentes podem ser segmentados em duas vertentes: a primeira, com os criados com base na diferença entre a velocidade operacional (V_{85}) medida entre dois pontos (ΔV_{85}) e a segunda, com os criados com base nas variações de velocidade individuais de cada veículo entre dois pontos ($\Delta_{85}V$) (Bella, 2007). Hirsh (1987) e Montella *et al.* (2014) concordam que os modelos da primeira (ΔV_{85}) subestimam as velocidades efetivamente praticadas pelos condutores.

Os modelos da segunda vertente quase em sua totalidade utilizam como parâmetro o 85º percentil das acelerações individuais experienciadas pelos veículos, e são criados a partir do acompanhamento contínuo de veículos ao longo das curvas. Estes comumente se baseiam em poucos motoristas trafegando ao longo de diversas curvas com características diferentes, porém a pequena amostra de condutores torna questionável a acurácia ao representar o 85º percentil da aceleração (Misaghi e Hassan, 2005). A familiaridade do condutor com o trecho, bem como seu estado mental no momento (atenção à direção, pressa, etc), têm grande influência sobre seu comportamento, alterando a intensidade das taxas de aceleração (Bertola *et al.*, 2012). O presente estudo propõe uma abordagem inversa à mais comum na literatura, analisando o comportamento de muitos motoristas ao longo de poucas curvas.

2. OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é a análise dos perfis de variação de velocidade dos veículos de passeio em curvas de rodovias de pista simples a partir de dados de velocidade medidos em campo. Os perfis serão traçados a partir da análise das taxas de variação de velocidade individuais ($\Delta_{85}V$) de cada um dos veículos.

O objetivo secundário é a avaliação da aderência dos modelos de previsão de taxas de desaceleração e aceleração de veículos de passeio em curvas existentes na literatura, comparando os resultados destes modelos quando aplicados para as condições geométricas das curvas em questão com os dados observados em campo.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

A literatura apresenta uma série de modelos que pretendem estimar as taxas de aceleração e desaceleração dos automóveis ao longo de curvas. Em um dos mais influentes estudos a discutir o tema, Lamm *et al.* (1988) concluiu que a diferença entre as taxas de aceleração e desaceleração era desprezível, sendo ambas aproximadas a $0,85 \text{ m/s}^2$, o que era compatível com a literatura técnica vigente na época. Os autores observaram ainda que a desaceleração começa a ocorrer cerca de 225 m antes do início da curva.

Tendo em vista que a aceleração e a desaceleração dos veículos são fenômenos fisicamente distintos, é adequado que estes sejam avaliados separadamente. Fitzpatrick *et al.* (2000) realizaram uma série de medições de velocidade ao longo de 21 curvas horizontais. Calculando a variação da velocidade a partir da V_{85} de cada ponto, o experimento mostrou que as taxas de variação nas tangentes anteriores e posteriores às curvas eram muito diferentes de $0,85 \text{ m/s}^2$, que a variação dentro da curva não é nula, e que o local onde os motoristas começam a desacelerar ou acelerar varia de curva para curva. O trabalho desenvolveu modelos diferentes para aceleração e desaceleração, ambos em função do raio da curva.

Echaveguren e Basualto (2003) coletaram dados de velocidade ao longo de 32 curvas circulares em rodovias chilenas, concluindo que os modelos de Lamm *et al.* (1988) e Fitzpatrick *et al.*

(2000) não eram satisfatórios para a realidade daquele país. O estudo apontou que, para curvas de raio maior que 250 m, a desaceleração dos veículos leves ocorre desde a tangente anterior até aproximadamente o centro da curva, e para curvas de raio menor que este valor, a desaceleração ocorre completamente na tangente, e o veículo tende a manter uma velocidade constante ao longo do desenvolvimento circular.

Hu e Donnell (2010) propõe uma análise que leva em consideração os elementos altimétricos e o comportamento do veículo nas curvas anteriores para determinar as taxas de aceleração e desaceleração. Com base em dados de 16 motoristas em 32 curvas horizontais, os autores concluíram que motoristas desaceleram a maiores taxas caso tenham saído da curva anterior em altas velocidades, e que o raio e o desenvolvimento das curvas têm influência significativa nas taxas de aceleração e desaceleração.

Pérez-Zuriaga *et al.* (2010) desenvolveram modelos para previsão da desaceleração na aproximação de curvas em função do raio e do CCR (*curvature change rate*, ou a taxa de variação da curvatura) da curva (não levando em consideração as características do restante do trecho). Em trabalho posterior, os autores reanalisaram os mesmos dados com outras técnicas e geraram um novo modelo, além de concluírem que a distância de desaceleração dos veículos está entre 100 e 50 m (Pérez-Zuriaga *et al.*, 2013).

Altamira *et al.* (2014) registraram o comportamento de nove motoristas em 386 curvas na Argentina. O estudo analisou as acelerações médias no desenvolver das curvas e concluiu que as taxas de desaceleração aplicadas na aproximação de curvas dependem do raio e da inclinação do greide, enquanto as taxas de aceleração após o fim da curva são principalmente influenciadas pela distância disponível para acelerar, sofrendo pouco ou nenhum efeito pela inclinação do greide. A distância de desaceleração apresentou fortes relações com o raio e a velocidade inicial do veículo. Tal distância variou entre 50 e 230 m para velocidades iniciais de 50 a 110 km/h.

Em experimento com 39 motoristas em uma rodovia italiana, Montella *et al.* (2014) concluíram que tanto as características planimétricas do trecho precedente como o perfil altimétrico da curva têm um efeito importante na velocidade operacional, e conseqüentemente nas taxas de variação de velocidade. No estudo, foram desenvolvidos modelos para aceleração e desaceleração considerando tanto a variação da velocidade operacional (ΔV_{85}) quanto a variações de velocidade individuais dos veículos ($\Delta_{85}V$), que levam em conta além do raio, a deflexão da curva, a inclinação e o CCR do trecho.

Para além do desenvolvimento de modelos fundamentados em dados coletados em campo, o aprimoramento dos simuladores de direção tem permitido a pesquisa deste tema em ambientes virtuais. Simulando variadas situações de familiaridade, desatenção e pressa, Bertola *et al.* (2012) observou que o comportamento dos condutores no que tange a velocidades e acelerações é perceptivelmente influenciado pelo contexto individual. Do mesmo modo, Bella (2014) analisou dados de 72 condutores e determinou que o método de cálculo das taxas de aceleração e desaceleração pelo método da V85 fornece resultados menores do que pelo método da $\Delta_{85}V$, o que subestima as taxas efetivamente praticadas pelos condutores. O trabalho apresenta modelos para o 85º percentil da aceleração e da desaceleração, desenvolvidos com base no raio da curva e da máxima velocidade operacional (V85) na tangente de aproximação da curva. O Quadro 1 apresenta os modelos estudados durante a elaboração deste trabalho.

Quadro 1: Modelos de previsão de taxas de aceleração e desaceleração

Autor	Modelo (a/d em m/s^2)	Aplicação (R em m)	Amostra	Observações
Lamm <i>et al.</i> (1988)	$d = 0,85$	N/A	N/A	Desaceleração/ aceleração na tangente de aproximação.
	$a = 0,85$	N/A		
Fitzpatrick, Elefteriadou, <i>et al.</i> (2000)	$d = 0,6749 - \frac{295,14}{R}$	$175 \leq R < 436$ $d_{85} = 1, R < 175$ $d_{85} = 0, R \geq 436$	N/A	Máxima desaceleração ou aceleração na tangente ou curva. Estimado a partir do ΔV_{85} .
	$a = 0,54, \text{ para } 175 \leq R < 250$ $a = 0,43, \text{ para } 250 \leq R < 436$ $a = 0,21, \text{ para } 436 \leq R < 875$ $a = 0,00, \text{ para } 175 \leq R < 436$	$R > 175$		
Echaveguren e Basualto (2003) apud Echaveguren <i>et al.</i> (2020)	$d = \frac{131,418}{R}$	$250 \leq R < 436$ $d_{85} = 0,55, R < 250$ $d_{85} = 0,24, R > 436$	32 curvas	Desaceleração/ aceleração na tangente de aproximação. Estimado a partir do ΔV_{85} .
	$a = \frac{52,524}{R}$	$a_{85} = 0,21, R < 250$ $a_{85} = 0,06, R > 436$		
Pérez-Zuriaga <i>et al.</i> (2010)	$d_{85} = 0,24 + 0,0015 * CCR$	$80 \leq R < 930$	81 curvas; 26 - 110 veículos por curva	Desaceleração na tangente de aproximação.
	$d_{85} = 0,264 + \frac{67,80}{R}$			
Pérez-Zuriaga <i>et al.</i> (2013)	$d_{85} = 0,447 + \frac{90,472}{R}$	$52 \leq R < 519$	37 curvas; 24 - 102 veículos por curva	Desaceleração na tangente de aproximação.
Bella (2014)	$d_{85} = -1,316 + \frac{148,28}{R} + 0,015 * V_{85\max_ta}$	$150 \leq R < 800$	26 curvas; 30 - 40 veículos por curva	Desaceleração/ aceleração máximas na aproximação/ afastamento.
	$a_{85} = -0,567 + \frac{74,47}{R} + 0,007 * V_{85\max_td}$			
Montella <i>et al.</i> (2014)	$d = 0,277 + \frac{0,098}{R} - 0,0017 * CCR_{2km} + 0,037 * Gu$	$250 \leq R < 2775$	45 curvas; 39 veículos por curva	Estimado a partir do ΔV_{85} .
	$a = 0,159 + \frac{0,035}{R} + 0,025 * Gd - 0,027 * Gu$			
	$d_{85} = 0,546 + \frac{0,134}{R} - 0,0015 * def - 0,015 * CCR_2 + 0,009 * Gd + 0,156 * TN$			Estimado a partir do $\Delta_{85}V$.
	$a_{85} = 0,350 + 0,048 * Gd - 0,022 * Gu$			
Hashim <i>et al.</i> (2016)	$d = -0,211 + \frac{6,32}{\sqrt{R}}$	$59 \leq R < 823$	32 curvas; 30 veículos por curva	Desaceleração na tangente de aproximação. Estimado a partir do ΔV_{85} .
	$a = -0,374 + \frac{12,52}{\sqrt{R}}$			

d, a = desaceleração/aceleração [m/s^2]; d_{85} , a_{85} = 85º percentil da desaceleração/aceleração [m/s^2]; R = raio da curva [m]; CCR = taxa de variação da curvatura da curva [grados/km]; CCR_{2km} taxa de variação da curvatura dos 2 km precedentes à curva [grados/km]; $V_{85\max_ta}$ = velocidade operacional máxima na tangente de aproximação [km/h]; $V_{85\max_td}$ = velocidade operacional máxima na tangente de afastamento [km/h]; def = deflexão da curva [grados]; Gd = declive equivalente [%]; Gu = aclave equivalente [%]; e TN = variável túnel (0 se o segmento não esta em um túnel, 1 se está).

Fonte: Autoria própria

4. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

4.1. Cenário e origem dos dados

Os dados analisados neste trabalho foram coletados por d’Azevedo (2020), cuja dissertação de mestrado analisou os perfis de velocidade de veículos de carga, e gerou como subproduto um banco de dados que reúne também as informações veículos de passeio e coletivos. As curvas analisadas estão localizadas na ERS-122, rodovia rural de pista simples entre os municípios de Antônio Prado e Vacaria, no estado do Rio Grande do Sul, inserida em região ondulada, com velocidade regulamentada igual a 60 km/h.

Os elementos característicos da geometria, tais como raios de curvas horizontais, deflexões, intertangentes, rampas e curvas de concordância vertical, foram obtidos a partir de vídeo registro e de levantamento aerofotogramétrico com drone, e processados e geometrizados no *software* SAEPRO. As características planialtimétricas das curvas analisadas nos dois sentidos de tráfego (crescente, para o norte; e decrescente, para o sul) são exibidas na Tabela 1.

Tabela 1: Características geométricas das curvas analisadas

Curva	Raio (m)	CCR _{curva} (grados/ km)	CCR _{2km} (grados/ km)	Lado	Active equiv. (Gu) [%]	Declive equiv. (Gd) [%]	Tangente de aprox. (m)	Tangente de afast. (m)
180N	280	156,54	55,13	Externo	0,00	-3,40	456,4	266,3
180S			94,28	Interno	3,40	0,00	266,3	456,4
214N	160 (lc = 60)	281,05	69,22	Interno	0,30	-1,52	1023,5	620,7
214S			82,9	Externo	1,52	-0,30	620,7	1023,5
222N	1003	64,37	48,92	Interno	0,00	-1,36	378,2	649,8
222S			60,74	Externo	1,36	0,00	649,8	378,2

No levantamento, foram instalados sensores do tipo tubo pneumático nas tangentes anteriores e posteriores e ao longo das curvas. Os equipamentos registram informações dos veículos, como o momento da passagem, a velocidade, a distância entre eixos e a sua classificação. Os pontos escolhidos para coletar os dados, representados na Figura 1, foram sete: 1) 200 m antes do início da curva; 2) 100 m antes do início da curva; 3) início da curva; 4) meio da curva; 5) fim da curva; 6) 100 m após o fim da curva; e 7) 200 m após o fim da curva.

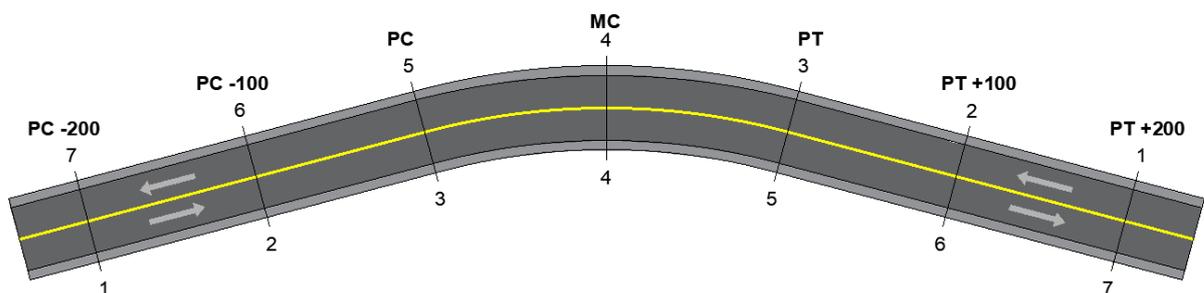


Figura 1: Posicionamento dos tubos pneumáticos

4.2. Processamento e análise preliminar dos dados

A análise dos dados foi realizada por meio do *software* fornecido pela fabricante dos sensores pneumáticos e Microsoft Excel, onde foram filtrados os registros de veículos de carga e os com erro e executados os demais procedimentos para o cálculo das taxas de variação de velocidade foram realizados. Após a segregação dos dados das três curvas por sentido, foram removidos todos os veículos que não estavam em condição de fluxo livre (headway maior que 10 s).

Uma vez que foram coletados dados de tráfego bidirecionais, cada curva pode ser analisada a partir de duas abordagens: na primeira, os dados de cada sentido de tráfego são analisados separadamente, como se fossem curvas diferentes; já na segunda os dados de ambos os sentidos da curva são combinados e analisados sem distinção. A primeira abordagem é preferível caso haja diferenças significativas de um sentido para o outro, seja na geometria ou na composição do tráfego, já a segunda é adequada caso as diferenças entre os sentidos sejam insignificantes a ponto de não interferir no comportamento dos condutores. Após análise preliminar dos dados coletados, e tendo em vista que o perfil altimétrico e o CCR dos 2 km anteriores à curva são considerados influentes e utilizados com variáveis de alguns modelos de previsão, a primeira abordagem foi escolhida para este trabalho.

Embora os dados coletados permitam a identificação de cada veículo nos locais de medição, o número limitado de pontos não permite o cálculo da taxa instantânea de variação da velocidade. Em vez disso, este trabalho utilizará taxas médias de variação, determinadas entre dois pontos. Como convenção, a taxa de variação da velocidade com sinal negativo será chamada de desaceleração, e a taxa de variação de velocidade com sinal positivo será chamada de aceleração. Tal convenção torna-se importante uma vez que diversos trabalhos anteriores tratam estes fenômenos separadamente, ambos com sinal positivo, mas este os analisa conjuntamente. A análise conjunta de ambos os fenômenos permite levar em consideração que, mesmo em locais onde se espera que sempre haja desaceleração, como antes de uma curva, pode-se eventualmente verificar a ocorrência de aceleração, e vice-versa. Em consequência disso, o método escolhido para a análise do perfil de variação de velocidade neste trabalho é o 85º percentil da desaceleração ou aceleração.

4.3. Avaliação da aderência dos modelos existentes aos dados observados

Os modelos existentes na literatura selecionados para a avaliação de aderência aos dados observados em campo foram todos os estimados com base nas variações individuais de velocidade (Δ_{85V}). A Tabela 2 apresenta os modelos selecionados para avaliação.

Tabela 2: Modelos selecionados para avaliação

Modelo	Variáveis	R ²
Modelos de previsão da desaceleração		
Pérez-Zuriaga et al. (2010)	Raio ou CCR _{curva}	0,70 (raio), 0,71 (CCR _{curva})
Pérez-Zuriaga et al. (2013)	Raio	0,68
Bella (2014)	Raio, V _{85 máx}	0,59
Montella et al. (2014)	Raio, CCR _{2km} , aclave equiv.	0,40
Modelos de previsão da aceleração		
Bella (2014)	Raio, V _{85 máx}	0,54
Montella et al. (2014)	Raio, aclave equiv., Declive equiv.	0,56

Os modelos selecionados para avaliação podem ser divididos em dois grupos: os criados por Bella (2014) e por Pérez-Zuriaga *et al.* (2010, 2013), que expressam a desaceleração ou a aceleração como a máxima variação de velocidade medida entre a tangente e a curva; e os criados por Montella *et al.* (2014), que consideram os dados de todo o comprimento analisado, não especificando os locais de início e fim destes fenômenos. Para a comparação dos resultados de cada modelo, as taxas de variação de velocidade dos veículos foram calculadas separadamente, de acordo com os critérios definidos pelos autores de cada grupo.

A avaliação da aderência dos dados observado aos modelos de previsão propostos pela literatura será realizada pela comparação dos EPMA's (erro percentual médio absoluto) e as REQM's (raiz

do erro quadrático médio) de cada modelo. É importante notar que as taxas utilizadas para traçar os perfis de variação de velocidade das curvas não são as mesmas utilizados para a avaliação dos modelos de previsão. Os modelos são desenvolvidos para prever uma taxa de desaceleração ou aceleração constante antes e depois da curva, a ser utilizada na elaboração de perfis de velocidade e na avaliação da sua consistência geométrica. Os perfis de variação de velocidade elaborados neste trabalho, por outro lado, utilizam os dados observados em campo entre todas as estações de medição, e são úteis na identificação de padrões que levem a uma melhor compreensão do comportamento dos condutores ao longo das curvas, aspecto importante na fase de projeto de novas rodovias e na avaliação da segurança viária de trechos existentes.

5. ANÁLISES E DISCUSSÕES

Nesta seção são apresentadas as análises realizadas sobre os perfis de variação de velocidade dos veículos observados em campo, bem como o estudo da aderência dos dados observados aos modelos pré-existentes na literatura. A amostra de veículos em cada curva está na Tabela 3.

Tabela 3: Número de veículos considerados em cada curva e sentido analisados

Curva	180N	180S	214N	214S	222N	222S
Veículos	532	497	445	483	252	279

5.1. Análise dos perfis de variação de velocidade

A determinação do 85º percentil da desaceleração e da aceleração se deu pelo cálculo dos 15º e 85º percentis das taxas de variação da velocidade. Tal interpretação é necessária visto que ambos os dados foram analisados conjuntamente. Para traçar o perfil de variação de velocidade, foram considerados os valores do 15º percentil (desaceleração) na tangente de aproximação e na primeira metade da curva, locais onde predomina o comportamento de desaceleração, e os valores do 85º percentil (aceleração) na segunda metade da curva e na tangente de afastamento, onde predomina o comportamento de aceleração. A escolha do local de transição de comportamento, no meio da curva, é justificada pela análise do gráfico de ambos os percentis, exibido na Figura 2. Há uma perceptível mudança de comportamento antes e depois deste ponto.

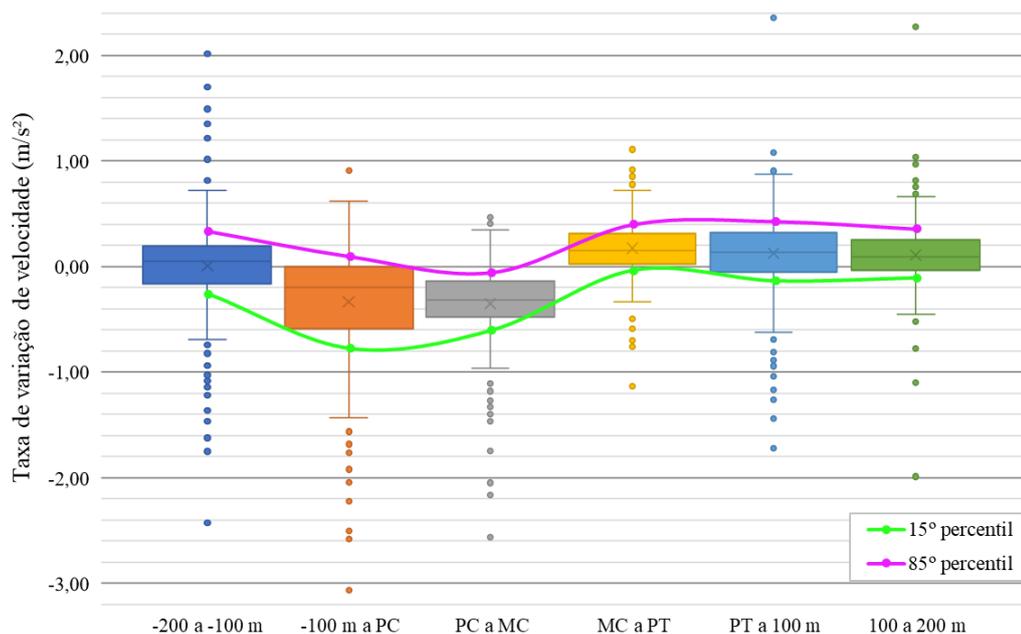


Figura 2: 15º e 85º percentis das taxas de variação de velocidade para a curva 180N

O gráfico das velocidades operacionais observadas nas estações de medição, apresentado na Figura 3, sugere que curvas com raios menores, mesmo que compostas com curva de transição (como é o caso da curva 214, com raio de 160 m e transição de 60 m), exigem dos motoristas grande redução na velocidade, enquanto curvas de raio maior (como a curva 222, de raio 1003 m) apresentam maiores velocidades e menores variações, e estas tendem a ocorrer mais próximas da curva.

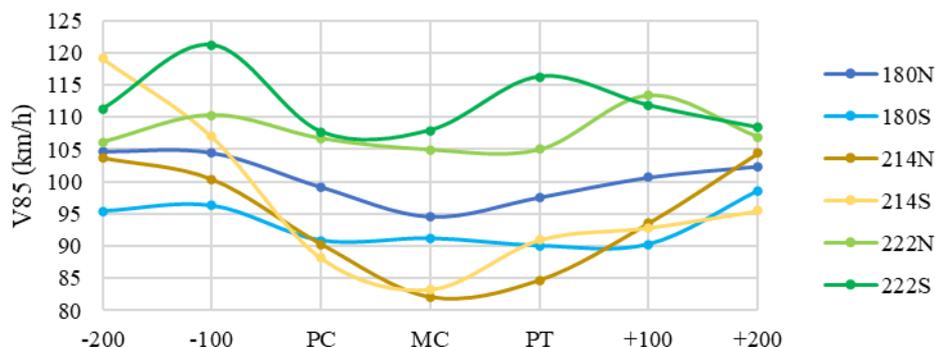


Figura 3: Variação da velocidade operacional observada nas estações nas curvas analisadas

Observando os perfis de variação de velocidade na Figura 4, percebe-se que há importantes diferenças entre o comportamento dos condutores em cada sentido de tráfego de uma mesma curva. Este fato sugere que fatores como o greide e a extensão das tangentes de aproximação e afastamento pode ter influência nas taxas de desaceleração e aceleração, e conseqüentemente que a utilização apenas do raio ou do CCR da curva como variável explicativa em modelos de previsão pode ser um fator que limite a aderência destes a dados coletados em campo.

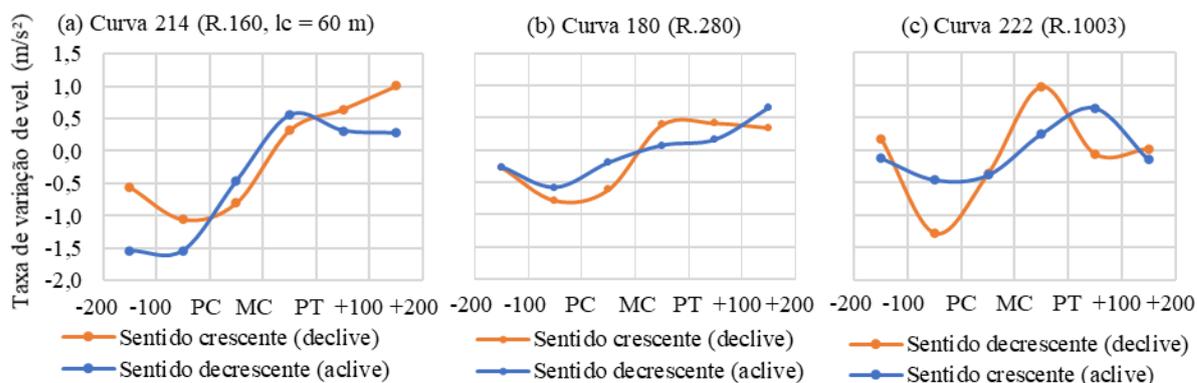


Figura 4: Perfis de variação de velocidade das curvas analisadas

A diferença mais perceptível entre os perfis dos dois sentidos se dá na curva 222, que tem raio amplo e declividade praticamente constante ao longo de todo o trecho analisado. Esta curva apresenta taxas de desaceleração antes da curva mais de duas vezes maiores no sentido decrescente, em declive, do que no crescente, em aclive, mesmo que a rampa seja pequena, de 1,58%. Esta característica sugere que elementos geométricos menos demandantes, como curvas de raios amplos ou longas tangentes, aumentam a variabilidade de comportamento dos condutores, enquanto elementos mais críticos, como curvas de pequeno raio, compelem os condutores a adotar um padrão semelhante de comportamento.

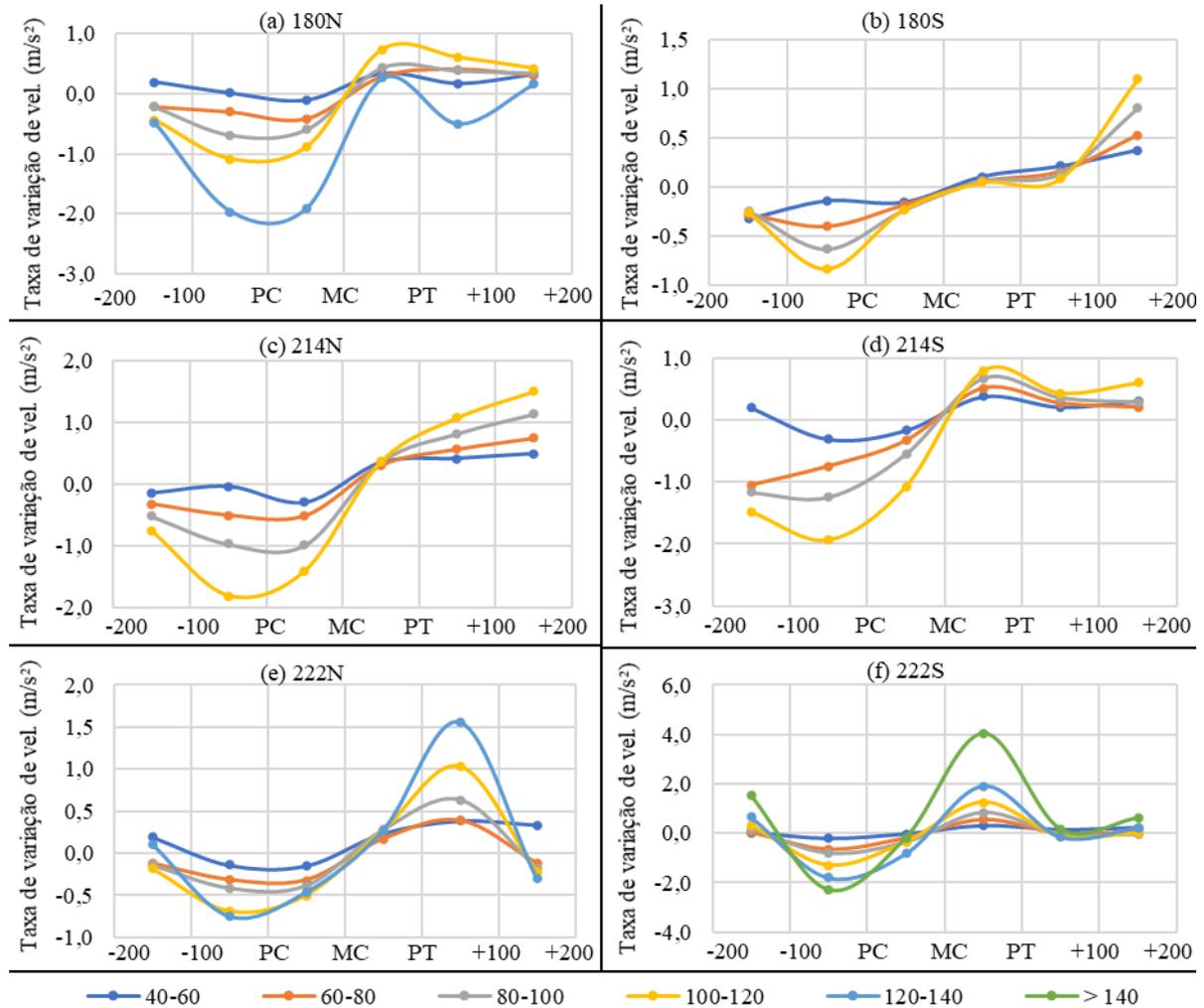


Figura 5: Taxas de variação de velocidade por grupos de velocidade inicial (em km/h)

Analisando os perfis de variação de velocidade segregados por faixa de velocidade inicial (velocidade do veículo a 200 m do início da curva) apresentados na Figura 5, percebe-se que condutores com alta velocidade inicial tendem a praticar taxas de desaceleração e aceleração maiores, tanto nas curvas de maior quanto nas de menor raio. As taxas de desaceleração maiores são esperadas, uma vez que é necessária uma maior redução da velocidade para percorrer a curva com segurança, e as taxas de aceleração igualmente (ou até mais) altas sugerem que estes condutores apresentam comportamento similar ao longo de todo o trecho, o que pode gerar situações potencialmente perigosas. Os condutores com baixas velocidades iniciais, por outro lado, tendem a praticar taxas próximas de zero, o que também é esperado, visto que estas proporcionam condições seguras no decorrer da curva.

5.2. Relação entre $\Delta_{85}V$ e ΔV_{85}

Diversos autores descrevem a relação entre a variação da velocidade operacional entre dois pontos (ΔV_{85}) e o 85º percentil das variações de velocidade entre dois pontos ($\Delta_{85}V$). Em geral, a literatura relata que a ΔV_{85} fornece resultados mais conservadores do que $\Delta_{85}V$, subestimando as taxas efetivamente praticadas pelos motoristas, o que a torna inadequada para traçar o perfil de velocidades de um segmento. A Figura 6 apresenta a comparação entre as taxas de variação

de velocidade calculadas pela ΔV_{85} e pela $\Delta_{85}V$ para umas das curvas analisadas, onde se observa claramente esta relação.

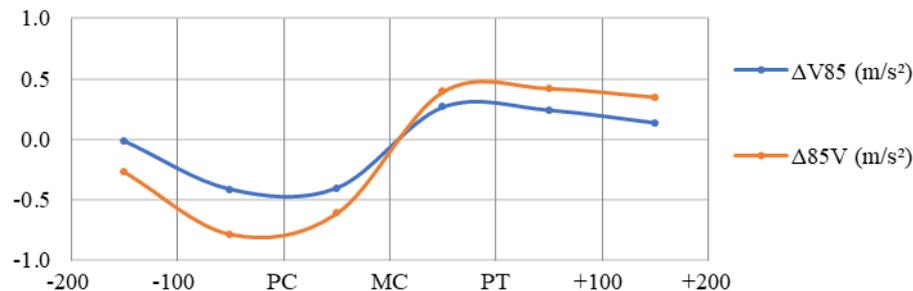


Figura 6: Comparação entre as taxas de variação de velocidade calculadas pela $\Delta_{85}V$ e pela ΔV_{85} para a curva 180N

5.3. Avaliação da aderência dos dados aos modelos existentes

Os indicadores EPMA e REQM foram calculados para as curvas analisadas, entretanto, devido ao baixo número de curvas, e ao fato de que nem todos os modelos se adequam a todas as curvas (cada modelo se aplicou a apenas duas curvas, ou quatro conjuntos direcionais), estes dados devem ser avaliados com cuidado. A Tabela 4 apresenta os erros calculados para cada modelo.

Tabela 4: Comparação dos EPMA e REQM calculados para cada modelo

Modelo	Amostra de curvas	EPMA	REQM
Modelos de previsão da desaceleração			
Pérez-Zuriaga et al. (2010)	4	21,71% (raio), 22,87% (CCR)	24,08% (raio), 22,68% (CCR)
Pérez-Zuriaga et al. (2013)	4	42,74%	26,67%
Bella (2014)	4	46,96%	32,92%
Montella et al. (2014)	4	58,08%	54,23%
Modelos de previsão da aceleração			
Bella (2014)	4	17,85%	8,99%
Montella et al. (2014)	4	61,58%	46,92%

A análise dos indicadores calculados permite inferir que, para a previsão das taxas de desaceleração, os modelos criados por Pérez-Zuriaga *et al.* (2010), tanto em função do CCR da curva individual como do raio da curva apresentaram os menores erros. Os resultados de ambos foram semelhantes, o que é esperado, visto que foram estimados a partir do mesmo conjunto de dados, mas o baseado no CCR forneceu previsões ligeiramente melhores, o que pode indicar que o grau de curvatura tem sim influência sobre as taxas de desaceleração. A Figura 7 apresenta a comparação entre os resultados de cada modelo e as taxas de desaceleração e aceleração observadas em campo calculadas de acordo com os critérios de cada grupo de modelos.

Dos dois modelos analisados para previsão das taxas de aceleração, o que melhor se adere aos dados medidos em campo é o estimado por Bella (2014). Os modelos propostos por este autor foram desenvolvidos com dados coletados em um simulador de direção, e a boa aderência aos dados observados em campo analisados neste trabalho sugere que esta ferramenta pode gerar importantes subsídios para o estudo das taxas usuais de aceleração de veículos de passeio.

É visível nos gráficos da Figura 7 que as taxas de desaceleração e aceleração observadas calculadas pelos critérios dos grupos 1 e 2 são consideravelmente diferentes, com as do segundo

usualmente maiores. Isso se deve à diferença no critério para determinar onde começam e terminam de ocorrer os fenômenos de desaceleração e aceleração. O critério do segundo grupo, de utilizar o valor limite de $0,2 \text{ m/s}^2$ para detectar estes locais pode não ser adequado para uma análise utilizando um número relativamente baixo de estações de medição de velocidade como a realizada neste trabalho.

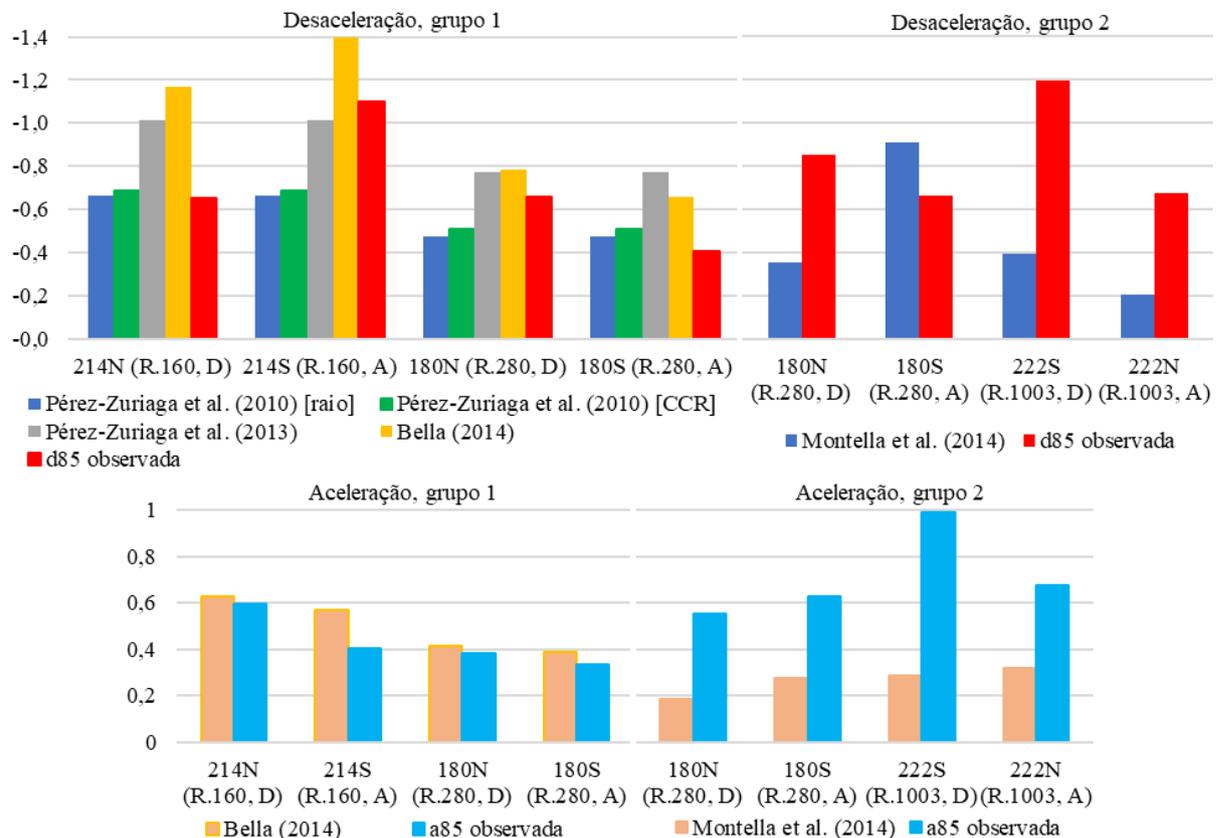


Figura 7: Comparação entre as taxas de desaceleração e aceleração previstas e observadas para cada grupo de modelos (em m/s^2 ; R = raio, em m; A = aclave, e D = declive)

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve por finalidade contribuir para o entendimento do comportamento dos condutores brasileiros no que tange às taxas usuais de aceleração e desaceleração praticadas, a partir da análise de perfis de variação de velocidade, bem como avaliar os modelos de previsão dessas taxas existentes na literatura que melhor se aderem aos dados observados em campo. Os perfis de variação de velocidade aqui analisados podem ser utilizados como referência quando da criação de modelos de previsão estimados com dados coletados em rodovias brasileiras, uma vez que o alto número de condutores registrado permite o cálculo com satisfatória precisão dos indicadores operacionais da via.

A análise dos perfis de variação de velocidade permite entender com maior clareza o comportamento dos condutores ao longo de curvas: os com maiores velocidades iniciais tendem a praticar taxas mais elevadas de aceleração e desaceleração, o que pode indicar comportamentos de risco, e curvas de menores raios tendem a compeli-los a adotar padrões semelhantes de comportamento. Embora apresentem similaridades, os perfis de variação de velocidade em cada sentido de tráfego têm diferenças importantes, e a simples análise conjunta

destes perfis com os dados planialtimétricos das curvas não permite que se identifique uma relação imediata entre a geometria e as taxas de desaceleração e aceleração observadas. A avaliação dos modelos pré-existentes na literatura determinou que as equações criadas por Pérez-Zuriaga *et al.*, em 2010, para previsão das taxas de desaceleração são as que melhor se aderem aos dados observados em campo, e que o modelo criado Bella em 2014 representa com boa acurácia o comportamento de aceleração dos condutores. É importante ressaltar, entretanto, que o baixo número de curvas analisadas e, conseqüentemente, de variações de geometria para comparação dos modelos, faz com que estes dados devam ser analisados com cuidado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Altamira, A. L., Garcia, Y., Echaveguren, T., e Marcet, J. E. (2014) Acceleration and deceleration patterns on horizontal curves and their tangents on two-lane rural roads. *93rd TRB Meeting* (p. 15). Washington, D.C.
- Bella, F. (2007) Parameters for Evaluation of Speed Differential. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2023(1), 37–43. doi:10.3141/2023-05
- Bella, F. (2014) Driver Performance Approaching and Departing Curves: Driving Simulator Study. *Traffic Injury Prevention*, 15(3), 310–318. doi:10.1080/15389588.2013.813022
- Bertola, M. A., Balk, S. A., e Shurbutt, J. (2012) *Evaluating Driver Performance on Rural Two-Lane Horizontal Curved Roadways Using a Driving Simulator (Report No. FHWA-HRT-12-073)*. McLean, VA.
- D’Azevedo, Z. S. (2020) *Elaboração de modelo da previsão da velocidade operacional de rodovias em pistas simples considerando os veículos de carga*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Echaveguren, T., e Basualto, J. (2003) El analisis de aceleraciones en la consistencia de elementos simples de alineamientos horizontales. *XI Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte* (p. 391–402). Santiago.
- Echaveguren, T., Henríquez, C., e Jiménez-Ramos, G. (2020) Longitudinal Acceleration Models for Horizontal Reverse Curves of Two-Lane Rural Roads. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 15(1), 103–125. doi:10.7250/bjrbe.2020-15.463
- Fitzpatrick, K., Elefteriadou, L., Harwood, D. W., Collins, J. M., McFadden, J., Anderson, I. B., Krammes, R. A., Irizarry, N., Parma, K. D., Bauer, K. M., e Passetti, K. (2000) *Speed Prediction for Two-Lane Rural Highways (Report No. FHWA-RD-99-171)*. Washington, D.C.
- Fitzpatrick, K., Wooldridge, M. D., Tsimhoni, O., Collins, J. M., Green, P., Bauer, K. M., Parma, K. D., Koppa, R., Harwood, D. W., Anderson, I. B., Krammes, R. A., e Poggioli, B. (2000) *Alternative design consistency rating methods for two-lane rural highways (Report No. FHWA-RD-99-172)*. Washington, D.C.
- García, D. S. P. (2008) *Método para análise da consistência geométrica de rodovias brasileiras de pista simples*. Univesidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Hashim, I. H., Abdel-Wahed, T. A., e Moustafa, Y. (2016) Toward an operating speed profile model for rural two-lane roads in Egypt. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 3(1), 82–88. doi:10.1016/j.jtte.2015.09.005
- Hirsh, M. (1987) Probabilistic Approach to Consistency in Geometric Design. *Journal of Transportation Engineering*, 113(3), 268–276. doi:10.1061/(ASCE)0733-947X(1987)113:3(268)
- Hu, W., e Donnell, E. T. (2010) Models of acceleration and deceleration rates on a complex two-lane rural highway: Results from a nighttime driving experiment. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 13(6), 397–408. doi:10.1016/j.trf.2010.06.005
- Lamm, R., Choueiri, E. M., e Hayward, J. C. (1988) Tangent as an independent design element. *Transportation Research Record*, (1195), 123–131.
- Misaghi, P., e Hassan, Y. (2005) Modeling Operating Speed and Speed Differential on Two-Lane Rural Roads. *Journal of Transportation Engineering*, 131(6), 408–418. doi:10.1061/(ASCE)0733-947X(2005)131:6(408)
- Montella, A., Pariota, L., Galante, F., Imbriani, L. L., e Mauriello, F. (2014) Prediction of Drivers’ Speed Behavior on Rural Motorways Based on an Instrumented Vehicle Study. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2434(1), 52–62. doi:10.3141/2434-07
- Ng, J. C. W., e Sayed, T. (2004) Effect of geometric design consistency on road safety. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 31(2), 218–227. doi:10.1139/103-090
- Pérez-Zuriaga, A. M., Camacho-Torregrosa, F. J., e García, A. G. (2013) Tangent-to-Curve Transition on Two-Lane Rural Roads Based on Continuous Speed Profiles. *Journal of Transportation Engineering*, 139(11), 1048–1057. doi:10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000583
- Pérez-Zuriaga, A. M., García, A. G., Camacho-Torregrosa, F. J., e D’Attoma, P. (2010) Modeling Operating Speed and Deceleration on Two-Lane Rural Roads with Global Positioning System Data. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2171(1), 11–20. doi:10.3141/2171-02