

INFLUÊNCIA DE CARACTERÍSTICAS DOS VEÍCULOS PESADOS PARA O PROJETO DE CURVAS VERTICAIS CONVEXAS EM RODOVIAS BRASILEIRAS

Waldemiro de Aquino Pereira Neto

Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes – PETRAN

Universidade Federal do Ceará

João Alexandre Widmer

Escola de Engenharia de São Carlos - EESC

Universidade de São Paulo

RESUMO

A concordância de greides em projeto de rodovias é obtida através da utilização de curvas verticais. Tradicionalmente, o dimensionamento destes elementos é realizado a partir de parâmetros que utilizam como referência as dimensões e o desempenho de veículos de passeio. Um destes parâmetros é a distância de visibilidade de parada, que está intrinsecamente relacionada ao desempenho dos veículos no processo de frenagem e à altura de visão de seus motoristas. Neste artigo é investigada a influência da frenagem de caminhões no cálculo dos padrões mínimos recomendados para o projeto das curvas verticais. Para as análises realizadas foram considerados as diretrizes propostas no manual vigente no Brasil e em outros países.

ABSTRACT

Vertical curves are used in geometric design to effect gradual changes between tangent grades. Traditionally, these elements are designed based on vehicle performance parameters. One such parameter is the stopping sight distance, which is intrinsically linked to the braking performance of vehicles and height of drivers' sight. This paper investigates the effect of trucks braking process on the determination of the recommended minimum standards for the design of vertical curves. For these analyses, the guidelines proposed in the geometric design manuals in Brazil and in other countries were compared.

1. INTRODUÇÃO

O ato de projetar a geometria de uma via de forma adequada está condicionado a uma correta compreensão dos elementos que interagem com a via: o motorista e o veículo. Enquanto o motorista apresenta características inerentes à sua condição humana, como as limitações de visão, os tempos necessários para a percepção e reação, bem como sua capacidade de processar informações – características que não mudam significativamente ao longo das gerações – os veículos experimentam marcantes transformações, impulsionadas pelos avanços tecnológicos das últimas décadas e pela busca em atender as exigências de um mercado competitivo.

Analisando o contexto internacional, desponta como marco no crescimento da frota de veículos de grande porte a implantação do *Surface Transportation Assistance Act* (STAA) em 1982, legislação federal americana que elevou os limites de peso e dimensões dos veículos de carga articulados e autorizou sua circulação nas rodovias interestaduais e em outras rodovias principais dos Estados Unidos. As transformações ocorridas na frota de veículos tornaram necessária a investigação dos impactos gerados na segurança viária, sendo determinado pelo Congresso Americano seu monitoramento, levando essa discussão para a comunidade técnica e científica, o que resultou na realização de eventos, como o *Symposium on Geometric Design for Large Trucks* (1986), que atestaram a necessidade de conhecer as características dos veículos e, sobretudo, adaptar o projeto das vias de forma a considerar suas restrições operacionais.

Tradicionalmente, os elementos da geometria relacionados aos processos de frenagem, ao comportamento dos veículos nas curvas horizontais e aos processos de ultrapassagem são determinados com base nos veículos de passeio. Esta prática tem recebido diversas críticas e é objeto de pesquisas. Nos Estados Unidos, a partir da implantação do STAA, com a elevação dos limites nas dimensões e carga dos veículos, uma série de investigações foi realizada, relacionando as dimensões dos veículos, seu desempenho e os parâmetros utilizados no projeto geométrico de vias. Estes estudos tiveram maior ênfase na interface dos veículos com a geometria das interseções, resultando na especificação de novos padrões de projeto para estes dispositivos. Com relação aos parâmetros de projeto ao longo dos trechos das rodovias, entretanto, os padrões se mantiveram em sua maioria baseados nos veículos de passeio.

Este trabalho tem como objetivo investigar a influência do desempenho de frenagem de veículos pesados para o projeto de curvas verticais, considerando as características de veículos de carga típicos da frota comercial brasileira. Desta forma, pretende-se verificar se o pior desempenho dos veículos de carga nos processos de frenagem é compensado pela maior altura de visão dos motoristas destes veículos, atestando ou não a adequabilidade no projeto de curvas verticais com base em veículos de passeio para a operação dos veículos pesados.

2. O PROJETO DE CURVAS VERTICAIS

A concordância vertical dos greides de uma rodovia é obtida através da utilização de curvas verticais. Para as curvas verticais convexas, é observada uma limitação na distância de visibilidade do motorista, de forma que, para garantir a segurança dos veículos, é necessário que estas distâncias sejam iguais ou superiores à distância de visibilidade de parada (D). Para determinar este parâmetro, são consideradas além desta distância, outras variáveis, como a altura de visão do motorista e a altura do obstáculo considerado.

2.1 Comprimento Mínimo das Curvas Verticais

A *American Association of State Highway and Transportation Officials* – AASHTO (AASHTO, 2004), determina valores mínimos para o comprimento da concordância vertical, denominado de $L_{v_{min}}$, para atender esta condição de visibilidade. Este valor pode ser expresso pelo fator K , que relaciona o comprimento da curva ($L_{v_{min}}$) com a diferença algébrica dos greides, sendo determinado para as curvas convexas conforme as Equações 1 e 2.

(a) Se $D < L_{v_{min}}$, tem-se:

$$K_{min} = \frac{D^2}{200 \cdot (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2})^2} \quad (1)$$

(b) Se $D > L_{v_{min}}$, tem-se:

$$K_{min} = \frac{2D}{\delta_i} - \left[\frac{200 \cdot (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2})^2}{\delta_i^2} \right] \quad (2)$$

onde:

K_{min} = comprimento da curva necessário para uma mudança de 1% no greide (m)

δ_i = diferença algébrica dos greides (%)

h_1 = altura da vista do motorista em relação à pista (m)

h_2 = altura do obstáculo (m).

Além do critério de menor distância de visibilidade de parada, apresentado há instantes, para a determinação dos valores de K_{min} nas curvas verticais, existem dois outros critérios considerados no *Manual* do DNER, atual Departamento de Infra-estrutura de Transportes – DNIT (DNER, 1999). O primeiro leva em conta um valor de máxima aceleração centrífuga admissível, com base num critério de conforto e calculado através da Equação 3.

$$K_{min} = \frac{V^2}{1296a} \quad (3)$$

onde:

V = velocidade de projeto (km/h)

a = aceleração centrífuga admissível, igual a 1,5% g (aceleração da gravidade) para rodovias de elevado padrão e 5% g para rodovias de reduzido padrão.

O outro critério, denominado de critério do mínimo valor absoluto é utilizado com o intuito de permitir ao motorista perceber a alteração de declividade longitudinal, sendo utilizado como comprimento mínimo da curva vertical ($L_{v_{min}}$) o valor correspondente a $0,6.V_p$, onde V_p é a velocidade de projeto em km/h. O valor de $L_{v_{min}}$ a ser adotado no projeto deverá ser o menor valor obtido, considerando-se os três critérios descritos. Vale ressaltar que apenas o primeiro critério resulta em variações nos valores de K_{min} caso sejam considerados veículos diferentes, sendo esta a situação a ser considerada na investigação proposta.

2.2 Distância de Visibilidade de Parada

A distância de visibilidade de parada é um elemento importante para o projeto geométrico de curvas verticais. Esta distância é composta de duas parcelas, sendo a primeira referente à distância percorrida durante o tempo de percepção e reação do motorista, e a segunda corresponde à distância percorrida durante o processo de frenagem. Sua determinação é função de três aspectos principais: o veículo, o pavimento e o motorista – sendo os dois primeiros intimamente associados ao processo de frenagem, envolvendo: (i) a tecnologia do sistema de freios - convencional ou *Antilock Break System* (ABS), (ii) a carga do veículo e sua distribuição e (iii) a pressão dos pneus e seu estado de conservação, em especial a profundidade das trilhas dos pneus, que, associada às características de atrito do pavimento, são fundamentais no desempenho de frenagem (FITZPATRICK, 1992).

A importância do motorista está relacionada especialmente ao tempo de percepção e reação e sua altura de visão, além de aspectos subjetivos, como habilidade, experiência e treinamento. Os estudos expressos na literatura convergem para um tempo de percepção e reação de 2,5 s, apesar dos valores pesquisados apresentarem uma elevada dispersão (TRIGGS; HARRIS, 1982). Segundo pesquisas desenvolvidas por Frambo, Fitzpatrick e Koppa (1997), este valor excede o 90º percentil dos tempos de percepção e reação dos motoristas, justificando sua adoção pela maioria dos manuais de projeto de vias. Considerando especificamente os caminhões, é verdadeiro afirmar que, por se tratarem de motoristas profissionais, este tempo de percepção e reação pode ser menor do que no restante da população. Os sistemas de freio a ar, historicamente utilizados em veículos de carga, todavia, possuem uma defasagem inerente

de 0,5 seg na aplicação dos freios, de forma que é apropriada a utilização do valor de 2,5 seg também para os motoristas de caminhões (HARWOOD; TORBIC; RICHARD, 2003).

A Equação 4 é utilizada para cálculo da distância de visibilidade de parada proposta pela AASHTO (2004) é:

$$D = 0,278 \cdot V \cdot t + \frac{V^2}{254 \cdot \left[\left(\frac{a}{9,81} \right) \pm 0,01 \cdot G \right]} \quad (4)$$

onde:

D = distância de visibilidade de parada (m)

V = velocidade do veículo (km/h)

t = tempo de reação, geralmente adotado t = 2,5 seg

a = taxa de desaceleração (m/s²)

G = declividade de rampa (%), sendo positiva para declives e negativa para aclives

O Manual do DNER (DNER, 1999), assim como os da *Transportation Association of Canada* – TAC (TAC, 1999) e da *Australian and New Zealand Road Transport and Traffic Authorities* – AUSTROADS (AUSTROADS, 2002), utilizam equações equivalentes, semelhante ao proposto pela AASHTO até o Manual de 1994 (AASHTO, 1994), utilizando o parâmetro *f*, referente ao fator de atrito e admitindo um tempo de percepção e reação de 2,5 seg, conforme mostrado na Equação 5:

$$D = 0,7 \cdot V + \frac{V^2}{[255 \cdot (f + i)]} \quad (5)$$

onde:

D = distância de visibilidade de parada (m)

V = velocidade do veículo (km/h)

f = fator de atrito, estabelecido para a velocidade considerada

i = greide (m/m), sendo positiva no sentido ascendente e negativo no sentido descendente.

3. MÉTODO

Para a análise proposta neste trabalho, foram investigados os parâmetros que são utilizados no projeto das curvas verticais e que apresentam mudanças em função do tipo de veículo considerado, como a distância de visibilidade de parada e altura de visão do motorista, conforme indicados anteriormente nas Equações 1 e 2. Dentre os materiais consultados foram utilizados o manual do DNER, além dos Manuais da AASHTO (AASHTO, 2004), TAC (TAC, 1999), e AUSTROADS (AUSTROADS, 2002).

Com base nos desempenho de frenagem de veículos de carga, obtidos na literatura e nos parâmetros adotados nos manuais de projeto será realizada uma análise para verificar a existência de compatibilidade na operação dos veículos de carga quanto ao tráfego em curvas verticais projetadas com base nas características de veículos de passeio. Cabe, desta forma, verificar se existe uma compensação da maior altura do motorista dos veículos de carga, ante

seu pior desempenho nos processos de frenagem, e conseqüentemente os dos valores de K_{min} exigidos por estes veículos.

3.1 Análise dos Parâmetros Altura de Visão do Motorista e Altura do Obstáculo

A altura de visão do motorista é mais crítica para os veículos de passeio, sendo utilizado pela TAC e AUSTROADS 1,05 m, valor que, de acordo com estudos realizados no Canadá, é menor do que 99% dos valores observados em motoristas de automóvel (TAC, 1999). A AASHTO utiliza uma altura de 1,08 m e o DNER, de 1,10 m. Para os ônibus ou caminhões simples a TAC recomenda o valor 1,8 m e, nos caminhões longos e combinações, valores entre 1,9 m e 2,4 m são adotados. A AASHTO propõe altura de 2,33 m e a AUSTROADS de 2,4 m, enquanto o *Manual* do DNER não estabelece valores para este parâmetro.

Com relação à altura do obstáculo, utilizado para a determinação da configuração das curvas verticais convexas, a AASHTO estabeleceu, a partir do *Manual* de 2001 uma altura de 600 mm, julgando ser um valor representativo da dimensão de um objeto capaz de causar riscos para o motorista e que pode ser reconhecido a tempo de parar o veículo antes de uma colisão. As versões anteriores do *Manual* da AASHTO propunham uma altura de 150 mm, valor que ainda é utilizado pelo DNER. Estudos de acidentes realizados por Frambo, Fitzpatrick e Koppa (1997), apontando que praticamente inexitem acidentes envolvendo obstáculos com altura entre 100 e 150 mm, motivaram a elevação deste valor para 600 mm, que é também considerado um valor conservador quando relacionado à altura da lanterna traseira dos veículos. Os *Manuais* da TAC e da AUSTROADS determinam um intervalo de valores para este parâmetro, em função do objeto a ser considerado, variando de zero, para o caso da sinalização horizontal, até 380 mm para a TAC e 600 mm para a AUSTROADS, representando a altura da lanterna traseira dos veículos.

3.2 Análise do Parâmetro Distância de Visibilidade de Parada

A AASHTO tem adotado distâncias de visibilidade de parada com base nos automóveis. A justificativa para isto é o fato que, apesar dos caminhões apresentarem pior desempenho nos processos de frenagem, e com isto resultar em maiores distâncias de frenagem, existe uma compensação nestes veículos, uma vez que a maior altura de visão do motorista proporciona maior distância de visibilidade. A própria AASHTO, entretanto, em seu *Manual*, recomenda que sejam providos maiores valores de distância de visibilidade para os trechos em declive, especialmente no final de rampas negativas, onde a velocidade dos caminhões se equipara à dos automóveis e a maior altura de visão dos motoristas não constitui vantagem significativa.

O cálculo da distância de visibilidade de parada utilizada pela AASHTO é determinado para a condição de frenagem com rodas travadas e pavimento molhado, ou seja, os coeficientes utilizados para a determinação do atrito longitudinal da interface pneu-pavimento são estabelecidos em favor da segurança, abaixo do observado para a situação de pavimento seco. Até o *Manual* publicado em 1994 (AASHTO, 1994), era apresentada uma tabela com valores de fatores de atrito longitudinal em função da velocidade do veículo, variando entre 0,40 para a velocidade de projeto de 30 km/h e 0,28 para a velocidade de 120 km/h. Os valores das distâncias de visibilidade utilizados pelo DNER e pela TAC seguem esta orientação, com fatores de atrito praticamente iguais ao proposto pela AASHTO.

Pesquisas desenvolvidas na década 1980 (OLSON et al., 1984) revelaram a inadequação em se considerar o processo de frenagem com rodas travadas em caminhões, uma vez que este é irreal e perigoso, dificultando o controle direcional dos veículos e causando muitas vezes a invasão de faixas adjacentes, elevando assim o risco de colisões. Fancher (1986) desenvolveu um modelo teórico relacionando distância de parada para semi-reboques trafegando em pavimento molhado com os valores de resistência a derrapagem. Os resultados indicaram valores de desaceleração da ordem de 0,23g a 0,3g para a velocidade de 32 km/h e da ordem de 0,17 g a 0,23g para a velocidade de 96 km/h. O trabalho de Fancher (1986) generalizou os resultados dos testes de distância de parada desenvolvidos por Olson et al. (1984). Segundo esses testes, foi observado que, para uma dada condição de pavimento, os semi-reboques demandam uma distância de parada igual a 1,4 vez a distância requerida pelos automóveis. Como a distância de parada é inversamente proporcional à desaceleração média, pode-se então dividir a taxa de desaceleração assumida para os automóveis pelo fator 1,4. A vantagem desta prática é a utilização do mesmo grau de risco existente na adoção dos valores de desaceleração dos automóveis, sem a necessidade de assumir valores para a resistência à derrapagem (MCLEAN; TZIOTS; GUNATILLAKE, 2002). Pesquisas mais recentes (Widmer, 2002) confirmam estes resultados de eficiência de frenagem em caminhões no Brasil.

Nas duas últimas edições do Manual da AASHTO (AASHTO, 2001, 2004) foi estabelecido valor único de taxa de desaceleração para os veículos, independentemente da velocidade e igual a $3,4 \text{ m/s}^2$, que corresponde a um fator de atrito longitudinal da ordem de 0,35. Este valor foi obtido a partir de estudo desenvolvido por Frambo, Fitzpatrick e Koppa (1997) e representa o 10º percentil da taxa de desaceleração dos veículos de passeio. Esta taxa de desaceleração representa um valor de frenagem controlada que é confortável para os passageiros e permite manter o veículo na sua faixa de tráfego, mesmo em situação de pavimento molhado. Os valores adotados continuam sendo propostos com base em veículos de passeio e são utilizados também para caminhões. Esta prática é justificada pelo fato de haver dados indicando que veículos de carga providos de sistema de freios ABS alcançam taxas de desaceleração em frenagens controladas próximas destes valores (AASHTO, 2004). Estatísticas do ano de 1992 mostravam que em torno de 42% dos semi-reboques americanos possuíam este sistema de freio e as projeções indicam que em curto prazo a quase totalidade dos veículos será dotada desta tecnologia (HARWOOD; TORBIC; RICHARD, 2003).

A determinação de valores diferentes para as distâncias de visibilidade em veículos de passeio e veículos de carga tem sido adotada em alguns manuais. O Canadá utiliza as distâncias de visibilidade de frenagem para a situação de rodas travadas, entretanto apenas para veículos de passeio e veículos de carga providos de sistema ABS de freios, visando a evitar a ocorrência da perda do controle direcional dos veículos de carga. Para os veículos de carga com sistema de freios convencional, é proposta a utilização das distâncias de visibilidade mais elevadas.

A AUSTROADS propõe a utilização de fatores de atrito longitudinal diferentes para automóveis e caminhões, considerando as seguintes justificativas (AUSTROADS, 2002):

(a) o pior desempenho de frenagem observado nos veículos descarregados, uma vez que o sistema de suspensão e os pneus do veículo contribuem com uma eficiência máxima de frenagem apenas quando o veículo está carregado;

- (b) veículos com carga mal distribuída entre os eixos podem ocasionar o deslizamento de um dos eixos lateralmente, criando uma situação de instabilidade nos demais eixos, podendo resultar em perdas na eficiência de frenagem da ordem de 15%;
- (c) a frenagem ineficiente dos veículos articulados, pois uma parcela aproximada de 50% não apresenta o desempenho de frenagem requerido; e
- (d) os pneus dos caminhões são projetados com a função principal de resistência ao desgaste e isto resulta em pneus com piores fatores de atrito em superfícies molhadas.

Os valores utilizados pela AUSTROADS foram obtidos a partir de estudos desenvolvidos por Harwood et al. (1990). A *Australian Vehicle Standards Rules – AVSR* especifica como parâmetros mínimos de desempenho de desaceleração para os sistemas de freio dos veículos pesados o valor de 0,29 g, chegando ao valor máximo de 0,59 g (MCLEAN; TZIOTS; GUNATILLAKE, 2002).

4. RESULTADOS OBTIDOS

Considerando que as distâncias de visibilidade de parada são mais elevadas para veículos de carga do que para automóveis, este parâmetro contribui para elevar os comprimentos mínimos das curvas verticais. Por outro lado, o parâmetro altura de vista do motorista, maior para os veículos de carga, contribui para sua redução, cabendo verificar se existe ou inexistência uma compensação que permita continuar adotando os comprimentos mínimos das curvas com base nos veículos de passeio, como atualmente tem sido praticado no *Manual* do DNER. A Tabela 1 mostra os valores calculados para a distância de visibilidade de parada, segundo os fatores de atrito longitudinal adotados em alguns países. Para o cálculo desses valores, foi utilizado um tempo de percepção e reação de 2,5 seg, declividade zero e distâncias em metros arredondadas para múltiplos de 5.

Tabela 1: Distância de Visibilidade de Parada para Veículos de Passeio e Caminhões.

VELOCIDADE DE PROJETO (km/h)	DISTÂNCIA DE VISIBILIDADE DE PARADA (m)						
	AASHTO	DNER		TAC		AUSTROADS	
		Distância Mínima	Distância Desejada	Auto	Caminhão	Auto	Caminhão
30	35	30	30	30	–	–	–
40	50	45	45	45	60	–	–
50	65	60	65	65	85	55	70
60	85	75	85	85	105	75	95
70	105	90	110	115	135	95	120
80	130	110	140	140	155	115	145
90	160	130	175	170	190	145	175
100	185	155	210	210	235	175	215
110	220	180	255	250	260	210	260
120	250	205	310	290	–	250	315
130	285	–	–	330	–	285	370

Fontes: (AASHTO, 2004), (TAC, 1999), (DNER, 1999) e (AUSTROADS, 2002).

O valor de desaceleração proposto atualmente pela AASHTO é o mesmo para automóveis e caminhões e resulta em distâncias de visibilidade semelhantes aos valores propostos no Manual de 1994 para as velocidades até 60 km/h. Por outro lado, para velocidades maiores, as distâncias de visibilidade foram reduzidas em até 18%, em virtude da utilização de taxa

única de desaceleração. A TAC e o DNER ainda utilizam valores de fator de atrito longitudinal com base na orientação do Manual da AASHTO de 1994. Para os caminhões, entretanto, a TAC estabelece distâncias de visibilidade diferenciadas para atender aos caminhões providos de sistema de freio convencional. O Manual do DNER admite a utilização de duas distâncias de visibilidade de parada, uma obtida com base nas velocidades de projeto, denominada distância de visibilidade desejável e outra considerando valores de velocidades médias, denominada distância de visibilidade mínima. O Manual exige que seja adotada ao menos a distância mínima, permitindo ainda que seja admitida uma situação de greide nulo. A justificativa alegada no próprio Manual é que existem margens de segurança nos fatores de atrito adotados nos processos de frenagem que permitem desprezar a existência de greides.

Considerando as distâncias de visibilidade estabelecidas pela TAC para caminhões, são observados valores até 33% superiores (para $V = 40$ km/h) às distâncias desejáveis recomendadas pelo DNER, e até 52% superiores (para $V = 100$ km/h), se considerada a adoção das distâncias mínimas propostas. Para os veículos com sistema de freio ABS, a TAC recomenda que sejam consideradas as mesmas distâncias calculadas para automóveis. A AUSTROADS também apresenta distância de visibilidade de parada diferenciada para automóveis e caminhões. As distâncias propostas para os caminhões são até 12% superiores aos valores utilizados no Brasil, quando consideradas as distâncias desejáveis, e até 44% superiores em relação à adoção das distâncias mínimas.

A Tabela 2 apresenta os valores de K_{min} calculados, utilizando os parâmetros recomendados nos manuais de projeto geométrico para automóveis e caminhões, com suas respectivas alturas de visão do motorista, altura dos obstáculos e distâncias de visibilidade de parada. No caso do DNER, foi admitido para os caminhões a distância de visibilidade de parada dos automóveis com uma majoração de 40%, de acordo com o proposto na pesquisa de Olson et al. (1984). Foram também calculados valores de K_{min} para distâncias de visibilidade mínima, com base nos valores de velocidade média adotados pelo DNER no lugar das velocidades de projeto. Estes valores de K_{min} estão apresentados entre parênteses na Tabela 2. Pode-se observar que os valores de K_{min} calculados dadas as condições assumidas nos quatro manuais de projeto são bastante díspares. A principal razão para este fato é a influência do parâmetro altura do obstáculo. O valor adotado pelo DNER, de 0,15 m, resulta nos maiores valores de K_{min} em comparação aos demais manuais, mesmo com o DNER utilizando distâncias de visibilidade de parada menores, baseadas em veículos de passeio. Esta constatação permite afirmar que, dado o conservadorismo adotado no Manual do DNER, as curvas verticais convexas proporcionam condições de visibilidade bastante superiores aos demais manuais, indicando também que, caso sejam considerados obstáculos de 0,20 m a 0,60 m, valores utilizados nos outros manuais, os valores de K_{min} adotados pelo DNER atendem com folga, tanto para as condições operacionais dos automóveis, como para os caminhões.

Tabela 2: Comparação dos Valores de K_{min} para Curvas Verticais Convexas (para $D < L_{v_{min}}$) com Base nos Parâmetros de Veículos de Passeio e de Caminhões.

VELOCIDADE E PROJETO (km/h)	K_{min}							
	AASHTO		TAC		AUSTROADS		DNER	
	Auto	Caminhão	Auto	Caminhão	Auto	Caminhão	Auto	Caminhão
	h_1	h_1	h_1	h_1	h_1	h_1	h_1	h_1
	1,08 m	2,33 m	1,05 m	2,40 m	1,05 m	2,40 m	1,10 m	2,40 m
	h_2	h_2	h_2	h_2	h_2	h_2	h_2	h_2
	0,60 m	0,60 m	0,38 m	0,38 m	0,20 m	0,20 m	0,15 m	0,15 m
20	1	1	–	–	–	–	–	–
30	2	2	2	–	–	–	2 (2)	2 (2)
40	4	3	4	4	–	–	5 (5)	5 (5)
50	7	4	7	8	7	5	10 (9)	10 (9)
60	11	7	13	12	12	8	18 (14)	19 (15)
70	17	11	23	20	20	13	29 (20)	32 (21)
80	26	16	36	26	31	19	48 (29)	51 (32)
90	39	24	53	39	46	28	74 (41)	78 (44)
100	52	32	80	59	67	41	107 (58)	115 (63)
110	74	45	110	73	98	63	164 (79)	170 (85)
120	95	58	150	–	139	90	233 (102)	251 (110)
130	124	76	200	–	197	126	–	–

Fontes: (AASHTO, 2004), (TAC, 1999), (DNER, 1999) e (AUSTROADS, 2002).

Comparando-se por outro lado os valores de K_{min} de cada manual separadamente, isto é, para uma mesma altura de obstáculo, pode se observado que, para o caso da AASHTO, a maior altura de visão do motorista de caminhão resultou numa redução significativa nos valores de K_{min} em relação aos valores tomados com base nos veículos de passeio. Como neste caso é admitido um desempenho de frenagem nos caminhões semelhante ao verificado nos automóveis, em virtude da tecnologia dos seus sistemas de freios, a vantagem da maior altura de visão destes motoristas é totalmente convertida numa redução no valor de K_{min} . Para a TAC e a AUSTROADS, foi verificada uma compensação das maiores distâncias de visibilidade de parada dos caminhões pela maior altura de visão proporcionada por esses veículos, resultando na obtenção de menores valores de K_{min} do que os obtidos para os veículos de passeio. Desta forma, dadas as condições assumidas nestes três manuais, pode-se concluir que estabelecer valores de K_{min} em curvas verticais convexas (para $D < L_{v_{min}}$) com base no comportamento dos veículos de passeio não representa risco para os caminhões.

Quanto aos resultados obtidos com os parâmetros do DNER, foi observado que existe uma compensação para as velocidades mais baixas, entre 30 e 60 km/h, com uma tendência dos veículos de carga exigirem valores de K_{min} um pouco superiores à medida que esta velocidade se eleva. Em razão, porém, de estas diferenças serem de pequena dimensão, uma análise de sensibilidade no fator de majoração das distâncias de frenagem dos caminhões mostrou que, se considerado um fator próximo ao utilizado, em torno de 35%, passa a ser verificada uma compensação em todas as faixas de velocidade, sendo obtidos valores de K_{min} iguais, tanto na simulação de automóveis como de caminhões. Considerando-se as margens de segurança conservadoras nas taxas de desaceleração utilizadas para o cálculo das distâncias de visibilidade de parada, pode-se admitir que, também neste caso, a prática de estabelecer comprimentos mínimos de curvas verticais convexas (para $D < L_{v_{min}}$) com base nos veículos

de passeio não compromete a segurança viária. As Figuras 1 e 2 apresentam os comprimentos mínimos das curvas verticais convexas, respectivamente para automóveis e caminhões, para os casos de, $D < L_{vmin}$ e $D > L_{vmin}$, considerando ainda os outros dois critérios utilizados pelo *Manual* do DNER para a determinação do L_{vmin} . As distâncias de visibilidade de parada e alturas do motorista e do obstáculo seguiram a orientação do DNER.

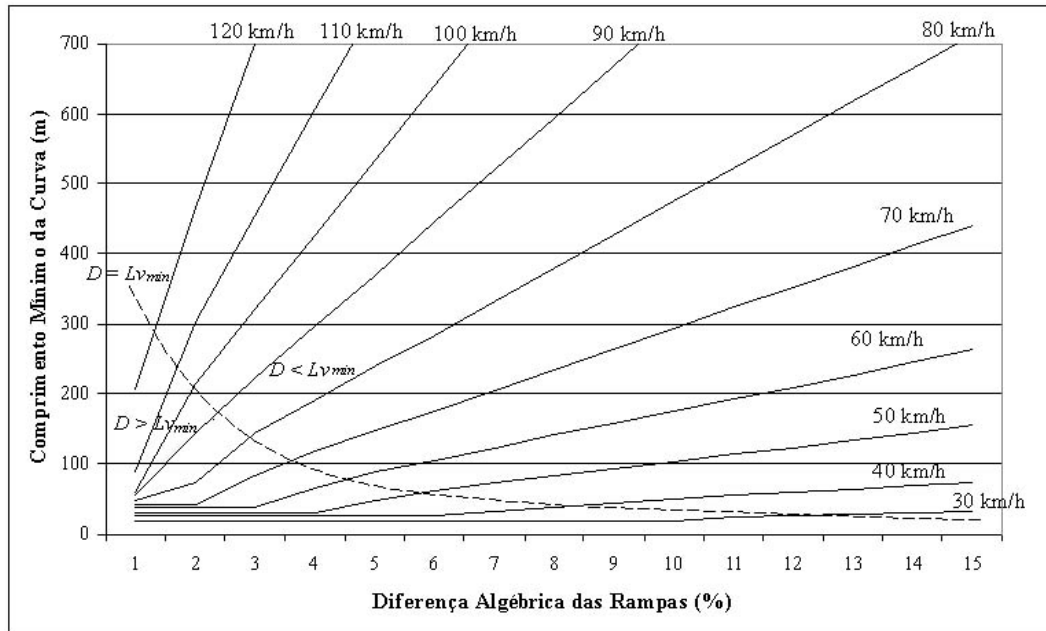


Figura1: Comprimento Mínimo das Curvas Verticais Convexas, Calculado com Base nos Veículos de Passeio ($h_1 = 1,1$ m).

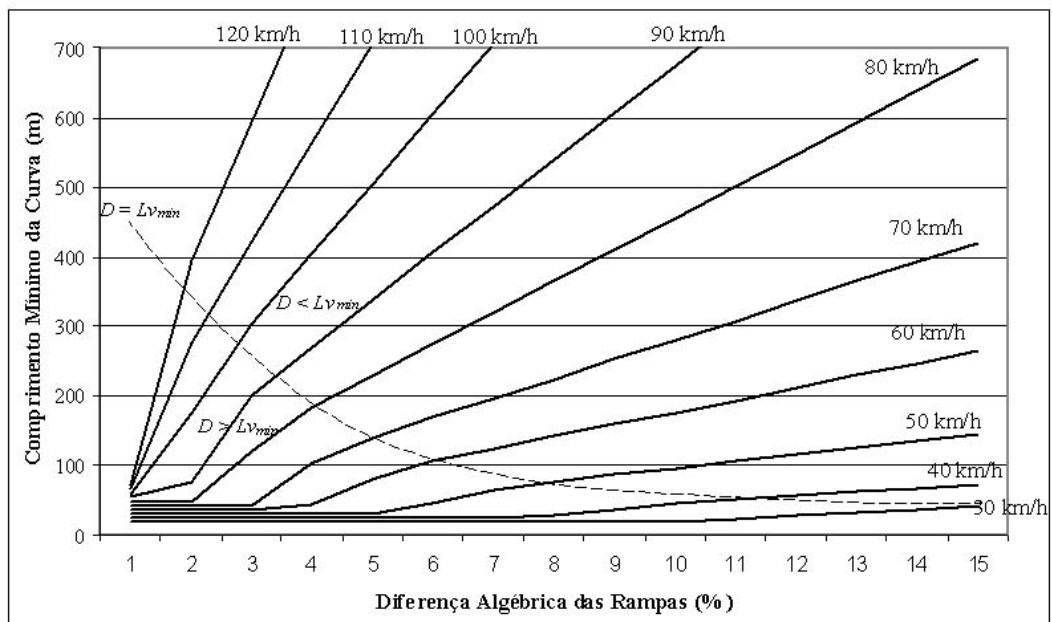


Figura 2: Comprimento Mínimo das Curvas Verticais Convexas, Calculado com Base em Caminhões ($h_1 = 2,4$ m).

Os valores observados nos gráficos mostram que, de um modo geral, não existe compensação da maior altura de visão dos veículos de carga ante suas maiores distâncias de frenagem, se admitida a majoração de 40% nas distâncias de frenagem dos caminhões. A análise de sensibilidade, contudo, mostrou que se esta majoração for da ordem de 30%, os valores de K_{min} são os mesmos, tanto para os veículos de passeio como de carga, revelando que, também para as curvas verticais convexas (para $D > L_{vmin}$), desde que admitida uma redução nas margens de segurança, podem ser calculados comprimentos mínimos com base em veículos de passeio.

5. CONCLUSÕES

Comparando as distâncias de visibilidade de parada apresentadas, e levando em conta a tecnologia de frenagem utilizada nos países citados, observa-se que no Brasil são assumidas menores margens de segurança para os processos de frenagem dos veículos de carga, elevando o risco para a ocorrência de acidentes. Apesar de não haver disponíveis dados oficiais, estima-se que apenas 3% dos caminhões brasileiros são providos de sistema ABS de freios. Diante deste prognóstico tão díspar das estatísticas americanas, é recomendada a adoção de distâncias com base no desempenho de frenagem dos caminhões para o projeto de vias cuja participação destes veículos no tráfego seja significativa.

A partir de 2010 e progressivamente até 2014 passará a haver obrigatoriedade de uso do sistema ABS de freios em veículos novos saídos de fábrica, como determina a Resolução 312/09 do Conselho Nacional de Trânsito – CONTRAN (Brasil, 2009). Entretanto, para os veículos de carga com PBT superior a 3,5 toneladas esta obrigatoriedade só terá início a partir de 2013. Considerando este fato, e ainda a elevada idade média da frota nacional, uma participação significativa de caminhões com desempenho de frenagem mais eficiente ainda é uma realidade distante. A adoção de distâncias mínimas de visibilidade, isto é, baseadas nas distâncias de frenagem obtidas a partir velocidade média do tráfego, como é permitido no Manual do DNER, compromete as condições de segurança, especialmente para os veículos de carga, não devendo ser utilizada, inclusive no projeto das curvas verticais.

O uso de distâncias mínimas de frenagem recai sobre uma discussão, a respeito da relação potência/massa dos caminhões brasileiros, que tem papel fundamental nas velocidades desenvolvidas por estes veículos. Apesar de existir o argumento de que os veículos brasileiros apresentam uma relação potência/massa em média mais baixa do que outros países, como os Estados Unidos, e que isto resulta num desempenho de velocidades mais baixas nos caminhões, é importante ressaltar que a frota nacional não possui inspeção técnica veicular e esta falta de controle resulta numa heterogeneidade no desempenho dos veículos, tanto nos processos de frenagem quanto em suas capacidades de aceleração, não sendo recomendado tratar a frota de veículos em função apenas de um valor médio de relação potência/massa. Considerando então que uma parte dos caminhões brasileiros é capaz de desenvolver velocidades elevadas, e ainda a existência dos trechos em declive, onde esta velocidade pode alcançar valores ainda superiores, é importante estabelecer condições seguras para a frenagem destes veículos, baseadas na velocidade de projeto da via.

Quanto às curvas verticais convexas, como foi observado nos resultados, a utilização de parâmetros de projeto com base em veículos de passeio não constitui comprometimento das condições de segurança para os veículos de carga. Entretanto, vale ressaltar que a altura de

visão de alguns veículos comerciais, como parte dos ônibus rodoviários modernos possui uma configuração em que a poltrona do motorista está localizada a uma menor distância do chassi do veículo, proporcionando altura de visão mais próxima do observado em automóveis do que o verificado em caminhões. Nestes casos é recomendada a verificação do desempenho de frenagem destes veículos, e sendo necessário, a indicação do uso de sistemas de freios mais eficientes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO (1994) *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets. American Association of State Highway and Transportation Officials*. 3th Edition, Washington, D.C., EUA.
- AASHTO (2001) *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets. American Association of State Highway and Transportation Officials*. 4th Edition, Washington, D.C., EUA.
- AASHTO (2004) *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets. American Association of State Highway and Transportation Officials*. 5th Edition, Washington, D.C., EUA.
- AUSTROADS (2002) *Rural Road Design: a guide to the geometric design of rural roads*. 6ª Edição. Sydney: Association of Australian and New Zealand Road Transport and Traffic Authorities; 126p.
- BRASIL (2009). Conselho Nacional de Trânsito. Dispõe sobre a obrigatoriedade do uso do sistema antitravamento das rodas – ABS nos veículos novos saídos de fábrica, nacionais e importados. Resolução nº 312, 03 de abril de 2009. Brasília.
- DNER (1999) *Manual de Projeto Geométrico de Rodovias Rurais*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, IPR, Rio de Janeiro, RJ.
- FANCHER, P. S. (1986) Sight distance problems related to large trucks. *Transportation Research Record*, Washington, v. 1052, p. 29–35.
- FITZPATRICK, K. (1992) Geometric Design and Operational Considerations for Trucks. *Institute of Transportation Engineers Journal*, Washington, p. 12–15.
- FRAMBO, D.B.; FITZPATRICK, K.; KOPPA, R.J. (1997) *Determination of Stopping Sight Distances*. NCHRP Report, Washington, v. 400.
- HARWOOD, D.W.; MASON JUNIOR, J.M.; GLAUZ, D.W.; KULAKOWSKI, T.B.; FITZPATRICK, K. (1990) Truck Characteristics for use in Highway Design and Operation, *Research Report FHWA*, Washington, v. 1–2.
- HARWOOD, D.W.; TORBIC, D.J.; RICHARD, K. R. (2003) Review of Truck Characteristics as Factors in Roadway Design. *NCHRP Report*, Washington, v. 505.
- MCLEAN, J.; TZIOTS, M.; GUNATILLAKE, T. (2002) *Geometric Design for trucks: When, Where and How?* Sydney: Association of Australian and New Zealand Road Transport and Traffic Authorities.
- OLSON, P.; CLEVELAND, D.E.; FANCHER, P.S.; KOSTYNIUK, L.P.; SCHNEIDER, L.W. (1984) *Parameters Affecting Stopping Sight Distance*. NCHRP Report, Washington, v. 270.
- SYMPOSIUM ON GEOMETRIC DESIGN FOR LARGE TRUCKS (1986). *Artigos...* Washington: Transportation Research Board.
- TAC (1999). *Geometric Design Guide for Canadian Roads*. Ottawa: Transportation Association of Canada.
- TRIGGS, T.J.; HARRIS, W.G. (1982) *Reaction Times of Drivers to Road Stimuli*: Human Factors Report. Victoria: Monash University.
- WIDMER, J.A. (2002) Análise Teórica da Eficiência de Frenagem de Algumas Configurações de Veículos Unitários e Combinações de Veículos Rodoviários de Carga Brasileiros. In: CONGRESSO SAE BRASIL, 11. São Paulo. *Anais...* São Paulo.