

Compatibilidade das faixas de mudança de velocidade para o tráfego de veículos pesados em rodovias brasileiras

Waldemiro de Aquino Pereira Neto¹; João Alexandre Widmer²

Resumo: Um importante dispositivo no projeto geométrico de interseções em rodovias com elevada velocidade de projeto e tráfego intenso são as faixas de mudança de velocidade. Este recurso, além de permitir uma maior capacidade da via, é responsável pela redução dos riscos de acidentes decorrentes da existência de veículos com elevado diferencial de velocidade compartilhando uma mesma faixa de tráfego, como as colisões traseiras e ultrapassagens em locais proibidos como nas imediações das interseções. Neste artigo é investigada a compatibilidade do tráfego de veículos de carga pesados utilizando faixas de aceleração e desaceleração, considerando que os manuais vigentes dimensionam estes dispositivos com base no desempenho de veículos de passeio.

Abstract: An important device that must be considered in geometric design of high speed and heavy traffic roads are the speed-change lanes of these facilities. This parameter, besides improving road capacity, is responsible for the risk reduction of accidents associated to their high-speed differential of vehicles sharing the same traffic lane, like rear-end collisions and overtaking in non-passing zones at intersections approaches. This paper presents an investigation considering traffic compatibility of heavy load vehicles, using acceleration and deceleration lanes, considering that the length requirements of these devices in the geometric design manuals are based on the performance of passenger cars.

1. INTRODUÇÃO

A frota de veículos de carga brasileiros seguiu ao longo dos últimos anos uma tendência observada em outros países como Estados Unidos, Canadá e Austrália, marcada pela utilização de veículos com maior capacidade de carga. No caso do Brasil, são observadas iniciativas nesse sentido, como a homologação e certificação de combinações de veículos de carga com comprimentos de até 30 m e peso bruto total de 74 toneladas.

Este comportamento pode ser explicado em parte, pela existência de pressão dos transportadores, visando essencialmente reduzir custos operacionais, em um mercado caracterizado por uma forte competitividade. Se por um lado esta tendência traz benefícios econômicos como a redução dos custos de transporte, uma série de impactos negativos também é observada, em sua maioria decorrente da inexistência de uma infraestrutura viária compatível com os requisitos operacionais desses veículos. Dados de acidentes nos Estados Unidos indicam que veículos longos, especialmente os veículos combinados, apresentam taxas de colisões com vítimas fatais aproximadamente 11% superiores quando comparadas aos acidentes observados em veículos simples (US DOT, 2000). Análises indicam que a causa principal dos acidentes envolvendo

veículos de maior capacidade é a utilização de uma infra-estrutura que foi projetada para veículos de menor porte e que é incompatível com a operação de veículos maiores (Donaldson, 1986).

Considerando inicialmente a operação de veículos com maiores dimensões, são verificados impactos importantes na concepção geométrica da via, uma vez que irão interferir em parâmetros de projeto como a largura das pistas de rolamento e dos acostamentos, assim como o cálculo das sobrelarguras nas curvas horizontais, que são influenciados por características dos veículos como sua largura, distância entre seus eixos e configuração de acoplamentos existentes. Analisando por sua vez, o acréscimo de carga transportada por estes veículos, são observados impactos de outra natureza, decorrentes da redução na capacidade de aceleração e no ganho de velocidade dos veículos, bem como seu desempenho nos processos de frenagem. Estas situações são normalmente associadas à ocorrência de trechos de rodovia com aclives e declives acentuados, demandando a implantação de faixas adicionais de subida ou descida (Melo, 2002 e Lucas, 2004). Entretanto, em situações como nas proximidades de uma interseção, onde são observadas manobras para inserção ou saída de veículos da via, o comportamento dos veículos quanto ao seu desempenho de aceleração e desaceleração também possui relevância significativa. Nestes casos, a existência de faixas de mudança de velocidade permite tanto elevar a capacidade da via, assim como reduzir os índices de acidentes.

Este trabalho tem como objetivo investigar as condições de compatibilidade existentes nas diretrizes de projeto propostas para o dimensionamento de faixas de mudança de velocidade em interseções, conside-

¹ Waldemiro de Aquino Pereira Neto, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, CE, Brasil. (e-mail: waldemiro@det.ufc.br).

² João Alexandre Widmer, Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos, SP, Brasil. (e-mail: widmer@sc.usp.br).

rando as características de veículos de carga típicos da frota comercial brasileira. Desta forma, espera-se identificar as restrições existentes à operação de determinados veículos, indicando-se as mudanças necessárias nas extensões e características destes dispositivos, de forma a adequar seu projeto para permitir a operação segura dos veículos que possuem maiores restrições operacionais.

2. FAIXAS DE MUDANÇA DE VELOCIDADE EM INTERSEÇÕES

O projeto de interseções rodoviárias brasileiras segue a orientação proposta pelo Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes – DNIT no Manual de Projeto de Interseções (DNIT, 2005). Este material consiste em uma atualização do Manual homônimo publicado pelo DNER em 1969, sendo resultado do Programa de Atualização de Normas e Manuais Técnicos. Esta publicação segue em linhas gerais, as determinações propostas no Manual da *American Association of State Highway and Transportation Officials* – AASHTO, em sua publicação no ano de 2001 (AASHTO, 2001).

Um dos importantes dispositivos utilizados nas interseções, principalmente em rodovias de velocidade de projeto elevada e tráfego acentuado é a implantação de faixas de mudança de velocidade. Estes dispositivos consistem em faixas auxiliares de tráfego, que têm por objetivo proporcionar espaço suficiente para os veículos que irão se inserir na via principal ajustarem suas velocidades a valores próximos daqueles observados na corrente de tráfego (faixas de aceleração) e para veículos que estão saindo da via reduzir suas velocidades sem interferir no fluxo de passagem (faixas de desaceleração). A inexistência deste dispositivo e o conseqüente uso compartilhado da mesma faixa de tráfego da via por veículos com velocidades diferentes provocam a realização de ultrapassagens nas proximidades das interseções, prática que eleva o risco da ocorrência de acidentes.

Além de reduzir o impacto de veículos com menor

velocidade em relação ao fluxo da corrente de tráfego, as faixas de desaceleração têm a função de permitir aos veículos que sairão da via principal, adaptarem suas velocidades às condições geométricas da via na qual irão se inserir. Um exemplo desta situação consiste nos trechos em curvas de raios reduzidos para o acesso a áreas lindeiras da via ou para a realização de manobras de conversão. A inobservância das velocidades de operação nestes acessos pode resultar na ocorrência de instabilidade lateral dos veículos, provocando o escorregamento ou tombamento do veículo durante a manobra, especialmente em veículos de carga.

As faixas de mudança de velocidade possuem duas configurações básicas, denominadas de *taper* e paralela. A do tipo *taper* pressupõe passagem direta do veículo de uma faixa de tráfego para outra faixa segundo um ângulo bastante pequeno, enquanto a faixa do tipo paralela é projetada com um trecho de faixa auxiliar de largura constante antes do início do *taper*. Como ilustração da aplicação deste tipo de dispositivo, a Figura 1 apresenta um dispositivo bastante utilizado em rodovias no Brasil, denominado de trevo vazado, que pode ser provido ou não de faixas de aceleração e desaceleração. Este tipo de interseção faz uso de ilhas de canalização, sendo o controle de tráfego realizado mediante placas de sinalização do tipo “PARE” na via secundária. Sua utilização apresenta algumas vantagens em virtude da desobstrução da via principal, quando os veículos pretendem realizar conversões à esquerda, que são canalizadas para a aproximação da via secundária. Este tipo de interseção, porém, apresenta desvantagens, como a presença de interferências entre as correntes de tráfego, potencializadas em função do elevado diferencial de velocidade entre os veículos que trafegam na via principal e aqueles que pretendem cruzá-la ou nela se inserir (Xerez, 2002). A existência de faixas de aceleração e desaceleração nestes dispositivos constitui uma importante medida para elevar o nível de segurança da interseção.

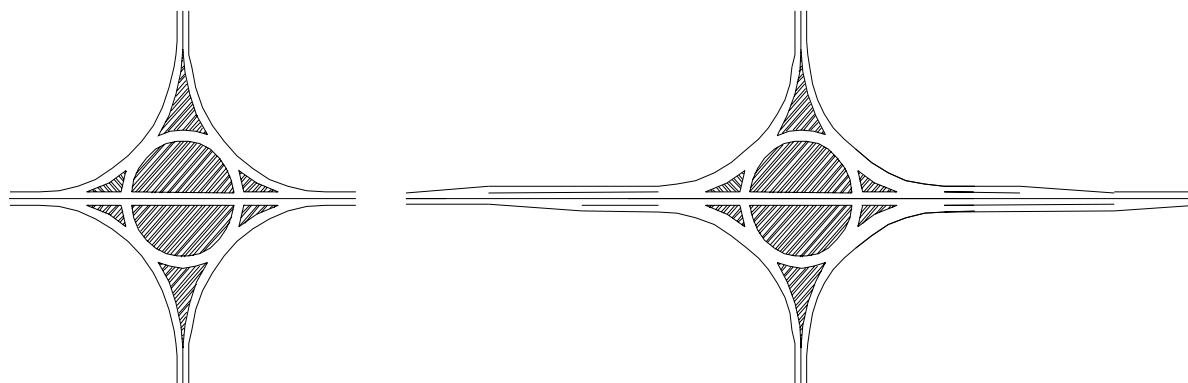


Figura 1: Interseções do tipo Trevo Vazado Simples e Trevo Vazado com Faixas de Aceleração e Desaceleração

2.1. Faixas de aceleração

O *Manual* do DNIT propõe extensões de faixas de aceleração tomando como base os veículos de passeio, entretanto reconhece que esta prática resulta em menor velocidade desenvolvida pelos caminhões no final da faixa auxiliar, dada sua menor capacidade de aceleração. No *Manual* é utilizada como argumento a tese de que os caminhões, em razão do seu maior porte, intimidam os veículos de passeio, que tendem a ceder espaço, diminuindo sua velocidade e dando oportunidade para que estes veículos se insiram na via principal. Este argumento, todavia, não é consistente, uma vez que o comportamento dos motoristas não é único, não devendo ser generalizado, de forma que situações como estas podem resultar em acidentes. Para os casos em que existe uma importante participação de veículos pesados no tráfego, o *Manual* recomenda que sejam consideradas maiores extensões para as faixas de aceleração, apesar de não especificar que valores seriam estes. Vale ressaltar ainda, que para rodovias enquadradas como vias expressas (Classe 0) o *Manual* do DNIT propõe a utilização de extensões mais elevadas, tanto para as faixas de aceleração quando de desaceleração. Entretanto, considerando que estas vias são providas de múltiplas faixas de tráfego, as análises realizadas neste trabalho se limitarão às faixas de mudança de velocidade propostas para rodovias de pista

simples, notadamente a situação mais crítica.

As Tabelas 1 e 2 apresentam os comprimentos necessários para as faixas de aceleração, recomendadas pelo DNIT (2005) e AASHTO (2004), respectivamente. Estes valores incluem a extensão do *taper*, os quais são determinados em função da velocidade do veículo no início da faixa auxiliar, admitindo que este atinja a velocidade média da via no final dessa faixa.

Essas distâncias do Manual do DNIT correspondem aos mesmos valores recomendados pela versão anterior do Manual de Projeto Geométrico do DNER (DNER, 1974) e são propostas para greides variando entre 0 e 2%. A AASHTO (2004) considera taxas de aceleração mais conservadoras para os veículos, de forma que, mesmo adotando uma velocidade no final da faixa de aceleração em torno de 10 km/h inferior às velocidades consideradas pelo DNIT, propõe maiores comprimentos para as faixas de aceleração. A justificativa do Manual brasileiro para adoção de comprimentos inferiores aos determinados pela AASHTO é sustentada em razões econômicas, sendo assumida ainda a idéia de que os valores propostos pelo DNIT são satisfatórios para as condições de tráfego do país (DNIT, 2005). Para o caso de rampas ascendentes superiores a 2%, bem como nas rampas descendentes, ambos os manuais estabelecem fatores de ajustamento de mesma grandeza, sendo observada também para es-

Tabela 1: Comprimento das faixas de aceleração em interseções adotado pelo DNIT para greides inferiores a 2%, incluindo o *taper*

VELOCIDADE DIRETRIZ (km/h)	VELOCIDADE NO FIM DA FAIXA DE ACELERAÇÃO (km/h)	COMPRIMENTO DA FAIXA DE ACELERAÇÃO (m)								
		Velocidade no Início da Faixa de Aceleração (km/h)								
		0	20	30	40	50	60	70	80	
40	38	60	50	40	-	-	-	-	-	
50	46	90	70	60	45	-	-	-	-	
60	54	130	110	100	70	55	-	-	-	
70	62	180	150	140	120	90	60	-	-	
80	71	230	210	200	180	140	100	70	-	
90	79	280	250	240	220	190	140	100	80	
100	86	340	310	290	280	240	200	170	110	
110	92	390	360	350	320	290	250	200	160	
120	98	430	400	390	360	330	290	240	200	

Fonte: (DNIT, 2005)

Tabela 2: Comprimento das faixas de aceleração em interseções adotado pela AASHTO para greides inferiores a 2%, incluindo o *taper*

VELOCIDADE DIRETRIZ (km/h)	VELOCIDADE NO FIM DA FAIXA DE ACELERAÇÃO (km/h)	COMPRIMENTO DA FAIXA DE ACELERAÇÃO (m)								
		Velocidade no Início da Faixa de Aceleração (km/h)								
		0	20	30	40	50	60	70	80	
50	37	150	140	120	-	-	-	-	-	
60	45	185	170	155	135	135	-	-	-	
70	53	240	220	200	180	155	-	-	-	
80	60	290	270	255	235	205	155	-	-	
90	67	350	335	315	295	265	215	125	-	
100	74	435	415	395	375	345	295	200	130	
110	81	520	500	480	460	430	380	290	215	
120	88	635	620	605	580	550	500	415	335	

Fonte: (AASHTO, 2004)

tes casos a existência de comprimentos para as faixas de aceleração no *Manual* do DNIT inferiores aos valores recomendados pela AASHTO.

2.2. Faixas de desaceleração

Da mesma forma que observado para as faixas de aceleração, as extensões das faixas de desaceleração adotadas pelo DNIT, são estabelecidas com base no comportamento dos veículos de passeio, sob a justificativa de que os caminhões desenvolvem velocidades inferiores ao observado nos automóveis. Este argumento, embora possa ser aplicado em uma parte da frota de caminhões, precisa ser analisado com maior atenção, uma vez que a frota de veículos comerciais brasileiros é marcada por intensa heterogeneidade, existindo veículos com elevadas relações potência/massa que permitem a operação em velocidades semelhantes ao observado nos automóveis. Conforme argumentam McLean, Tziots e Gunatillake (2002), o surgimento de inovações tecnológicas que levaram a um aumento na potência dos veículos de carga, além de melhorias no desempenho aerodinâmico – como a utilização de pneus com menor resistência interna ao rolamento – contribuíram para uma elevação na velocidade dos caminhões, deixando-a muito próxima da velocidade dos automóveis. Estima-se que atualmente a diferença entre o 85º percentil da velocidade dos automóveis e dos caminhões é menor do que 5%. Além disso, nas rodovias existentes em terrenos ondulados e montanhosos, os trechos em declive permitem a equiparação das velocidades dos caminhões aos valores observados nos automóveis, mesmo naqueles com menor capacidade de aceleração.

A Tabela 3 mostra os comprimentos das faixas de desaceleração propostos pelo Manual do DNIT, cujos valores são os mesmos recomendados pela AASHTO. Entretanto, para efeito de implantação da faixa de desaceleração, o Manual do DNIT assume que o veículo inicia sua desaceleração ao entrar no trecho em taper, diferentemente da recomendação da AASHTO, que considera que o processo de frenagem só se inicia no

trecho de largura constante. Desta forma, se considerada a extensão da faixa de desaceleração incluindo o taper, tem-se maiores extensões no Manual da AASHTO.

3. MÉTODO

Para a análise proposta neste trabalho, foi investigada a compatibilidade da extensão das faixas de aceleração e desaceleração, dimensionadas segundo as recomendações dos manuais da AASHTO e DNIT, para a operação de veículos representativos da frota de caminhões brasileiros. Em ambos os manuais os valores propostos são baseados no comportamento de veículos de passeio.

3.1. Análise das faixas de aceleração

Para a verificação das faixas de aceleração, foi utilizado o simulador *Truck Performance* - TRUPER (Demarchi, 2004). Esta ferramenta consiste em um simulador de desempenho veicular, que utiliza como dados de entrada as especificações técnicas do veículo, como a potência nominal do motor, as relações de engrenagens do câmbio e diferencial, a eficiência de transmissão, o peso total do veículo e do(s) eixo(s) trator(es), além de outros parâmetros. Foram considerados nesta análise veículos com relações potência/massa de caminhões típicos brasileiros (Melo, 2002), cujas características estão apresentadas na Tabela 4.

Estes dados dos veículos, juntamente com o perfil longitudinal (extensão e declividade das rampas), são utilizados no TRUPER em equações de desempenho para modelar o comportamento do veículo em termos de sua velocidade e aceleração. Estas equações são baseadas principalmente no método J2188 da SAE (1996), sendo que alguns dos coeficientes utilizados nestas equações foram adaptados para as condições brasileiras.

Tabela 3: Comprimento das faixas de desaceleração em interseções adotado pelo DNIT para greides inferiores a 2%, incluindo o taper

VELOCIDADE DIRETRIZ (km/h)	VELOCIDADE NO FIM DA FAIXA DE ACELERAÇÃO (km/h)	COMPRIMENTO DA FAIXA DE ACELERAÇÃO (m)							
		Velocidade no Início da Faixa de Aceleração (km/h)							
		0	20	30	40	50	60	70	80
40	38	60	50	40	–	–	–	–	–
50	46	75	70	60	45	–	–	–	–
60	54	95	90	80	65	55	–	–	–
70	62	110	105	95	85	70	60	–	–
80	71	130	125	115	100	90	80	70	–
90	79	145	140	135	120	110	100	90	80
100	86	170	165	155	145	135	120	100	85
110	92	180	180	170	160	150	140	120	105

Fonte: (DNIT, 2005)

Tabela 4: Características dos veículos simulados no TRUPER

ÍTEM	VEÍCULO 1	VEÍCULO 2	VEÍCULO 3	VEÍCULO 4	VEÍCULO 5	VEÍCULO 6
Tipo	U3A1S1	U3A1S1A1S1	2S2	3S3	2S2	2S2
Configuração	4x2	6x4	4x2	6x2	4x2	4x2
Unidade Tratora	MB L/LK 1414	VW 35.300	P230 (4x2)	Scania Carga Geral	P230	Volvo NH12 (4x2)
Motor	MB OM366	Cummins 6CTAA-294	Scania DC9 19 230	Scania DSC12 02	Scania DC11 07	Volvo D12D 420
Caixa de Mudança	Eaton FS 6306 A	Eaton RT 8609 A	Scania GR 801	Scania GRS 900	Scania GRS 900	Volvo VT2214
Diferencial	HL-4, para L/LK1414	Redução 4,1	Scania R780	Scania RBP835+RP835	Scania R780	Volvo RAN 471
Potência Nominal (cv)	136	294	230	360	322	420
PBTC (kg)	43000	63000	33000	48500	33000	31950
Relação pot/massa (cv/t)	3,16	4,67	6,97	7,42	9,76	13,13

3.2. Análise das faixas de desaceleração

Para a análise da extensão das faixas de desaceleração, foram calculadas as taxas de desaceleração utilizadas nos manuais de projeto e comparadas com os valores admitidos na literatura para os processos de frenagem dos veículos, em especial dos veículos de carga.

As taxas de desaceleração dos veículos consideradas nos manuais de projeto para a definição de parâmetros como as distância de visibilidade de parada são determinadas para a condição de frenagem com rodas travadas e pavimento molhado. Assim, 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* da AASHTO 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, valores estes adotados também no Brasil (DNER, 1999) e que corresponde a taxas de desaceleração da ordem de 3,9 e 2,7 m/s², respectivamente. Nas duas últimas edições do *Manual* da AASHTO (2001e 2004) foi estabelecido um valor único de taxa de desaceleração para os veículos, independentemente da velocidade e igual a 3,4 m/s², 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 10^o 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 aproximadamente

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).

Entretanto, quando considerados veículos providos de sistema de freios convencionais, realidade presente na significativa maioria da frota de veículos comerciais brasileiros, devem ser adotadas menores taxas de desaceleração. 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. As razões para considerar o processo de frenagem em caminhões de forma diferente dos veículos de passeio são (AUSTROADS, 2002):

- 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;
- 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%;
- a frenagem ineficiente dos veículos articulados, pois uma parcela aproximada de 50% não apresenta o desempenho de frenagem requerido; e
- 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.

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 va-

lores de desaceleração da ordem de 2,3 a 2,9 m/s² para a velocidade de 32 km/h e da ordem de 1,7 a 2,3 m/s² para a velocidade de 96 km/h. 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 2,8 m/s², chegando ao valor máximo de 5,8 m/s² (McLean; Tziots; Gunatillake, 2002).

4. RESULTADOS OBTIDOS

Antes de simular o comportamento dos veículos é importante atentar para suas velocidades de equilíbrio para as declividades a serem consideradas na simulação, como forma de identificar que níveis de velocidade estes veículos conseguem desenvolver. Estas velocidades estão apresentadas na Tabela 5.

Considerando que a velocidade dos veículos admitida no final da rampa de aceleração seja 20 km/h inferior à velocidade de projeto da via, conforme apontou estudo de ocorrência de acidentes realizado por Melo (2002), e tomando-se como exemplo uma rodovia com velocidade de projeto de 80 km/h, tem-se que:

- a. para o greide nulo, apenas o veículo de 3,16 cv/t não consegue atingir a velocidade estabelecida para o final da rampa de aceleração (60 km/h), entretanto alcança uma velocidade próxima deste valor;
- b. para o greide de 2%, os veículos de 7,42 cv/t, 9,76 cv/t e 13,15 cv/t conseguirão desenvolver velocidades próximas ou superiores a 60 km/h no final de uma rampa de aceleração; e
- c. (c) para o greide de 4%, apenas o veículo 13,15 cvt/ se aproxima da velocidade de 60 km/h e, no greide de 6%, nenhum dos veículos simulados atinge este patamar de velocidade.

Estes resultados mostram que, nas rodovias com velocidades de projeto mais elevadas, a concepção de interseções em trechos com greides ascendentes de 4% ou superiores compromete o ganho de velocidade da maioria dos veículos de carga, devendo ser evitada. A utilização de faixas de aceleração em greides desta magnitude constitui solução inócua para os veículos

com baixa relação potência/massa. Nesses casos, este dispositivo deveria ter sua extensão prolongada até a suavização do greide, assumindo assim a configuração de uma faixa adicional para trechos ascendentes.

Para analisar a adequação dos comprimentos das faixas de aceleração nas interseções, foram determinadas através de simulações no TRUPER as extensões necessárias para os veículos atingirem uma velocidade adequada ao final destas faixas, sendo admitida como velocidade mínima compatível um valor 20 km/h abaixo da velocidade de projeto da via. Os resultados obtidos com a simulação das faixas de aceleração estão apresentados na Tabela 6. Para efeito da simulação no TRUPER, foram considerados inicialmente greides constantes de 2%. Estão apresentados em negrito os valores que ultrapassam os comprimentos propostos pelo DNIT. Os valores sublinhados, por sua vez, representam os comprimentos que, apesar de superarem os valores propostos no *Manual* do DNIT, se mantêm abaixo das extensões propostas no *Manual* da AASHTO.

Os resultados da Tabela 6 indicam faixas de aceleração com extensões superiores aos valores propostos pelo DNIT em todos os veículos simulados em rodovias com velocidade diretriz de 80 km/h. A adoção de valores mais elevados como os comprimentos propostos pela AASHTO, mostrou-se compatível com algumas extensões requeridas pelos veículos de 7,42 cv/t, 9,76 cv/t e 11,35 cv/t. Para as velocidades entre 90 km/h e 120 km/h, os veículos simulados não conseguem atingir as velocidades propostas, uma vez que suas velocidades de equilíbrio estão abaixo de 70 km/h para o greide de 2%. Nestes casos, para garantir que o veículo se insira na rodovia com este patamar de velocidade, as faixas adicionais devem se estender até uma mudança de greide que favoreça o ganho de velocidade dos veículos.

Os resultados da simulação para rampas superiores a 2% indicam que, no caso de rampas ascendentes de 4%, apenas os veículos de 9,76 e 13,15 cv/t conseguem vencer esta declividade e atingir a velocidade compatível com a velocidade diretriz de 60 km/h. Nestes casos a extensão das faixas adicionais propostas pela AASHTO e DNIT se mostram compatíveis. Se considerada uma via com velocidade diretriz de 70 km/h, apenas o veículo de 13,15 cv/t atinge a veloci-

Tabela 5: Velocidade de equilíbrio dos veículos simulados para o terreno plano e rampas ascendentes

GREIDE	VELOCIDADE DE EQUILÍBRIO (km/h)					
	Veículo 1 3,16 cv/t	Veículo 2 4,67 cv/t	Veículo 3 6,97 cv/t	Veículo 4 7,42 cv/t	Veículo 5 9,76 cv/t	Veículo 6 13,15 cv/t
0%	60	75	86	95	105	100
2%	25	35	50	56	67	66
4%	15	22	30	36	45	54
6%	10	16	25	25	35	35

Tabela 6: Comprimento da faixa de aceleração para os veículos de carga, incluindo o taper – rampas ascendentes de 2% (em metros)

VELOCIDADE DIRETRIZ (km/h)	VELOCIDADE NO INÍCIO DA FAIXA DE ACELERAÇÃO (km/h)							
	0	20	30	40	50	60	70	80
Veículo 1 – 3,16 cv/t								
40	778	–	–	–	–	–	–	–
Veículo 2 – 4,67 cv/t								
40	40	–	–	–	–	–	–	–
50	45	194	–	–	–	–	–	–
Veículo 3 – 6,97 cv/t								
40	40	–	–	–	–	–	–	–
50	89	70	–	–	–	–	–	–
60	276	258	187	–	–	–	–	–
Veículo 4 – 7,42 cv/t								
40	40	–	–	–	–	–	–	–
50	57	45	–	–	–	–	–	–
60	175	161	118	–	–	–	–	–
70	530	486	443	326	–	–	–	–
Veículo 5 – 9,76 cv/t								
40	40	–	–	–	–	–	–	–
50	45	45	–	–	–	–	–	–
60	120	109	78	–	–	–	–	–
70	301	290	259	182	–	–	–	–
80	794	782	751	674	494	–	–	–
Veículo 6 – 13,15 cv/t								
40	40	–	–	–	–	–	–	–
50	45	45	–	–	–	–	–	–
60	78	69	55	–	–	–	–	–
70	175	166	145	97	–	–	–	–
80	354	344	323	276	180	–	–	–

dade de 50 km/h, e mesmo assim, requer maiores comprimentos para as faixas de aceleração do que o proposto pelo DNIT e pela AASHTO. Para as rampas ascendentes de 6%, apenas os veículos de 9,76 e 13,15 cv/t atingiram velocidades consideradas compatíveis com vias de velocidade igual a 50 km/h, onde nestes casos a extensão das faixas adicionais propostas pela AASHTO e DNIT se mostram compatíveis.

A Tabela 7 mostra as taxas de desaceleração necessárias para que os veículos consigam reduzir suas velocidades no final das faixas de desaceleração, admitidos os comprimentos das faixas de desaceleração determinados no *Manual* do DNIT. Analisando estes valores, percebe-se que exatamente nas faixas de veloci-

dade mais elevadas são demandadas as maiores taxas de desaceleração dos veículos. Considerando-se que os coeficientes de atrito na superfície pneu-pavimento diminuem à medida que as velocidades se elevam, pode-se constatar que as faixas de desaceleração para maiores velocidades de projeto apresentam os maiores problemas de incompatibilidade, indicando a necessidade de serem utilizadas maiores extensões de faixas de desaceleração. Mesmo admitindo os coeficientes de atrito longitudinal utilizados pelo próprio manual do DNIT, as taxas de desaceleração calculadas superam tais valores, como indicam os números em negrito da Tabela 7. Para este cálculo foram admitidas as velocidades médias consideradas pelo DNIT no início das

Tabela 7: Taxas de desaceleração dos veículos, calculada em função das extensões das faixas de desaceleração propostas pelo DNIT (greides inferiores a 2%)

VELOCIDADE DIRETRIZ (km/h)	VELOCIDADE NO INÍCIO DA FAIXA DE DESACELERAÇÃO (km/h)	TAXA DE DESACELERAÇÃO (m/s ²)							
		Velocidade no Final da Faixa de Desaceleração (km/h)							
		0	20	30	40	50	60	70	80
40	38	-1,86	-1,61	-1,05					
50	46	-2,18	-1,89	-1,56	-0,88				
60	54	-2,37	-2,16	-1,94	-1,56	-0,58			
70	62	-2,70	-2,53	-2,52	-2,04	-1,48	-0,31		
80	71	-2,99	-2,86	-2,78	-2,66	-2,18	-1,39	-0,16	
90	79	-3,32	-3,22	-3,05	-2,98	-2,62	-2,04	-1,15	–
100	86	-3,36	-3,27	-3,23	-3,08	-2,80	-2,44	-1,93	-0,90
110	92	-3,63	-3,46	-3,43	-3,31	-3,07	-2,68	-2,29	-1,52
120	98	-3,71	-3,64	-3,63	-3,53	-3,22	-2,99	-2,59	-2,06

faixas de desaceleração. Caso fossem admitidas as velocidades de projeto seriam obtidas taxas de desaceleração de até 5,6 m/s².

5. CONCLUSÕES

Os resultados das simulações mostram que as faixas de mudança de velocidade propostas segundo o Manual do DNIT apresentam extensões insuficientes para a operação de veículos de carga, especialmente nas vias com velocidades de projeto mais elevadas. Considerando inicialmente as faixas de aceleração, as simulações apontam que a adoção das extensões de faixa propostas pela AASHTO elevaria a compatibilidade para a operação dos caminhões, como verificado para os veículos com relação potência/massa de 7,42 cv/t ou superior. Para os veículos com relação potência/massa mais baixa, 3,16cv/t, 4,17cv/t e 6,97 cv/t, mesmo as extensões propostas pela AASHTO se mostram inferiores aos valores requeridos pelos veículos na simulação. Em particular o veículo de 3,16 cv/t apresentou desempenho bastante insatisfatório, sendo recomendada a existência de medidas restritivas à sua circulação em rodovias de maior velocidade.

Tomando como referência a pesquisa de caracterização da frota de caminhões brasileiros desenvolvida por Cunha *et al.* (2005) em rodovias do Estado de São Paulo e os resultados obtidos nas simulações, pode-se chegar às seguintes conclusões:

- a. Para os caminhões unitários de dois e três eixos, cujo 85° percentil das relações potência/massa observadas foi respectivamente 14 e 8,6 cv/t, assim como os veículos do tipo semi-reboque, onde a pesquisa revelou relações potência/massa variando entre 8 e 12,6 cv/t, as extensões das faixas de aceleração propostas pelo DNIT se mostram compatíveis para as velocidades de projeto de até 60 km/h, enquanto que para maiores velocidades, deveriam ser utilizadas maiores extensões de faixa. Em algumas situações os valores recomendados pela AASHTO se mostram compatíveis (ver Tabela 6).
- b. Se analisados os veículos extra-pesados, a pesquisa de caracterização da frota revelou o 85° percentil das relações potência/massa igual a 6 cv/t e que mais de 50% destes veículos apresentaram uma relação potência/massa inferior a 7,6 cv/t. As faixas de aceleração para estes veículos demandam maiores extensões, superando inclusive os valores propostos pela AASHTO, quando considerada a velocidades de projeto de 60 km/h.

Considerando que parte da indústria de caminhões brasileiros produz motores com limites de potência nominal média em torno de 420 cv, conclui-se que muitos veículos extra-pesados, cujo Peso Bruto Total Combinado é superior à 45 t, exigem, em princípio, maiores extensões nas faixas de aceleração. Este é o caso, por exemplo, de Combinações de Veículos de Carga com PBTC de 63t e 74t, cujas relações potência/massa são 6,67 cv/t e 5,68 cv/t, respectivamente, e que resultam em um desempenho de aceleração inferior ao verificado para a simulação do Veículo 3 (6,97 cv/t). Recomenda-se, portanto, considerar o emprego de maiores extensões das faixas de aceleração onde a participação destes veículos seja representativa.

Para as faixas de desaceleração foi observada maior incompatibilidade nas situações onde a velocidade diretriz da via é de 90 km/h ou superior, exigindo dos veículos uma maior capacidade de desaceleração. Nestas situações é importante atentar para a geometria e sinalização das vias que irão receber os veículos que saem da faixa de desaceleração, devendo ser assegurados nestes trechos:

- a. Distâncias de visibilidade da parada mais elevadas, reduzindo o risco da ocorrência de colisões,
- b. No caso da existência de curvas horizontais a adoção de raios mais generosos, reduzindo o risco de ocorrência de instabilidade lateral dos veículos e seu possível escorregamento ou tombamento,
- c. Quando necessário a redução da velocidade regulamentar da via, com reforço na sinalização, visando estimular a redução de velocidade dos condutores ao longo da via.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Donaldson, G.A. (1986) Safety of Large Trucks and the Geometric Design of Two-Jane, Two-way Roads. *Transportation Research Record*, Washington, v. 1052, p 10-14.
- 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.
- Cunha, A.L. B. N.; Mon-Ma, M. L.; Araújo, J. J.; Egami, C. Y.; Setti, J. R. A. (2005) Caracterização da frota de caminhões no sistema Anhanguera-Bandeirantes. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTE, 19., 2005, Recife. *Anais...* Recife: ANPET.
- Demarchi, S.R. (2004) *Truper: Simulador de Desempenho de Veículos Rodoviários e Ferroviários*. Versão 2.5d. Universidade Estadual de Maringá, Departamento de Engenharia Civil. Maringá.

- DNER (1974) *Manual de Projeto de Engenharia Rodoviária: Projeto de Interseções*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, IPR, Rio de Janeiro.
- DNER (1999) *Manual de Projeto Geométrico de Rodovias Rurais*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, IPR, Rio de Janeiro, RJ.
- DNIT (2005) *Manual de Projeto de Interseções*. Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes, IPR, Rio de Janeiro, RJ.
- Donaldson, G.A. Safety of Large Trucks and the Geometric Design of Two-lane, Two-way Roads. *Transportation Research Record*, Washington, v. 1052, p 10–14, 1986.
- Fancher, P. S. (1986) Sight distance problems related to large trucks. *Transportation Research Record*, Washington, v. 1052, p. 29–35.
- Frambo, D.B.; Fitzpatrick, K.; Koppa, R.J. (1997) Determination of Stopping Sight Distances. *NCHRP Report*, Washington, v. 400.
- Harwood, D.W.; Torbic, D.J.; Richard, K. R. (2003) Review of Truck Characteristics as Factors in Roadway Design. *NCHRP Report*, Washington, v. 505.
- Lucas, M.J. *Faixas adicionais para trechos de rodovias com declives longos considerando os aspectos técnicos da frenagem de veículos de carga*. 2004. 92f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- 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.
- Melo, R.A. (2002) *Faixas adicionais para aclives de rodovias brasileiras*. 2002. 178f. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- 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.
- SAE (1996) *Commercial Truck and Bus SAE Recommended Procedure for Vehicle Performance Prediction and Charting: Procedure J2188*. Warrendale: Society of Automotive Engineers.
- US DOT (2000) *Comprehensive Truck Size and Weight Study: Scenario Analysis*; US Department of Transportation, Washington.
- Xerez, R.S. (2002) *Método comparativo de desempenho para interseções em nível de rodovias de pista simples*. 2002.100. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.