

ACIDENTES E SEGURANÇA EM CURVAS DESCENDENTES Novo Critério de Regulamentação de Velocidade

EMENTA

Este trabalho estuda o aumento da velocidade em curvas por efeito da declividade longitudinal, alterando a regulamentação de velocidade máxima e o projeto de curvas descendentes, considerando o atrito de rolamento e o arrasto aerodinâmico.

RESUMO

As tabelas para projeto de curvas relacionam a velocidade máxima V com as características geométricas e físicas da curva, que são o raio R , a sobrelevação transversal e , e fator de atrito lateral da pista f . A formulação técnica considera assim o veículo com velocidade constante na curva.

Porém nas curvas descendentes a aceleração da gravidade aumenta a velocidade do veículo, podendo exigir frenagem para manter a velocidade, e assim provocando grande prejuízo à dirigibilidade dos veículos.

O presente trabalho demonstra e quantifica-se o efeito da declividade longitudinal e da extensão da curva na Velocidade de Projeto de Curva Descendente, comparando com os valores das tabelas usuais. É analisado o efeito da resistência aerodinâmica e das forças de atrito. Automóveis e veículos pesados são estudados separadamente, em função do comportamento distinto que apresentam, principalmente em curvas.

O objetivo do trabalho é fornecer elementos técnicos para a regulamentação da velocidade máxima em curvas descendentes existentes, e ao mesmo tempo possibilitar o refinamento dos critérios de projeto para novas vias, garantindo maior segurança nas curvas descendentes.

PRÁTICA VIGENTE DE DIMENSIONAMENTO E REGULAMENTAÇÃO DE VELOCIDADE MÁXIMA EM CURVAS HORIZONTAIS

As curvas circulares são tradicionalmente projetadas e construídas para operarem com velocidades máximas seguras, segundo uma equação que relaciona a velocidade de projeto V , o raio mínimo R , o coeficiente de atrito lateral f dos pneus com a pista, e a superelevação e (também chamada de sobrelevação ou de compensação transversal), tal como segue:

$$R_{\text{MIN}} = \frac{V^2}{127 (0,01e + f)} \quad \text{EQUAÇÃO 1}$$

(AASHTO 2001 – GREENBOOK, pg. 143, 4ª edição)

Onde: R_{MIN} = raio mínimo da curva circular [m]
 V = velocidade de projeto [km/h]
 e = superelevação em %
 f = coeficiente de atrito lateral

A tabela que segue, obtida da aplicação da equação acima, e utilizando para f os valores recomendados pela AASHTO (GREENBOOK 2001, pg. 145, 4ª edição) fornece os raios (valores arredondados) para as velocidades previstas no artigo 61 do CTB – Código de Transito Brasileiro (vias locais - 30 km/h; vias coletoras - 40 km/h; vias arteriais - 60 km/h; vias rápidas e caminhões em rodovias - 80 km/h; ônibus e microônibus em rodovias - 90 km/h; automóveis e camionetas em rodovias - 110 km/h):

V_{PROJETO} km/h	F	R_{MIN} $e_{\text{MÁX}}=4\%$	R_{MIN} $e_{\text{MÁX}}=6\%$	R_{MIN} $e_{\text{MÁX}}=8\%$	R_{MIN} $e_{\text{MÁX}}=10\%$	R_{MIN} $e_{\text{MÁX}}=12\%$
30	0,17	35	30	30	25	25
40	0,17	60	55	50	45	45
60	0,15	150	135	125	115	105
80	0,14	280	250	230	210	195
90	0,13	375	335	305	275	255
110	0,11	635	560	500	455	415

TABELA 1 : RAIOS E DECLIVIDADES TRANSVERSAIS PARA DIFERENTES VELOCIDADES DE PROJETO, SEM CONSIDERAR O EFEITO DA DECLIVIDADE LONGITUDINAL

AUMENTO DA VELOCIDADE DOS VEÍCULOS DEVIDO A DECLIVIDADE LONGITUDINAL – CURVA DESCENDENTES, CONSIDERANDO O ATRITO DE ROLAMENTO E A RESISTÊNCIA AERODINAMICA

A EQUAÇÃO 1 anterior considera que a velocidade do veículo na curva é constante. Porém nas curvas descendentes a aceleração da gravidade provoca aumento da velocidade.

As condições de dirigibilidade em curvas descendentes são adversas pela ação sinérgica dos seguintes fatores:

- Aumento da velocidade por ação da força de gravidade, podendo exigir frenagem na curva, extremamente perigosa para a dirigibilidade;
- Desequilíbrio longitudinal do peso dos veículos, com alívio do eixo traseiro, e conseqüente redução do atrito lateral possível nesse eixo, facilitando derrapagens de traseira. Este efeito é tanto maior quanto menor a distancia entre eixos, sendo portanto importante para automóveis.

A frenagem em curva, descendente ou não, compromete a estabilidade do veículo, aumentando o desequilíbrio transversal causado pela força de atrito lateral (a qual é aplicada no contato entre o pavimento e os pneus). Este desequilíbrio é tanto maior quanto mais elevado o centro de gravidade do veículo com relação ao pavimento, sendo portanto importante para ônibus e caminhões, tal como explicita a fotografia que segue:



A declividade longitudinal da curva acarreta a aceleração longitudinal do veículo em descida, aumentando sua velocidade. E a extensão – desenvolvimento – da curva determina a magnitude da velocidade adicional alcançada.

O veículo que trafega por uma curva descendente fica sujeito a um movimento uniforme acelerado, com aceleração **a** assim calculada:

$$a = \frac{g \cdot i}{100} = 0,0981 \cdot i$$

EQUAÇÃO 2

Onde: **g** = aceleração da gravidade (9,81 m/s²)
i = declividade longitudinal ou “greide” em %
a = **aceleração do movimento descendente**

Sabendo-se que o atrito de rolamento reduz a aceleração, será aplicado o redutor de 1,2% na declividade longitudinal, válido para pisos de asfalto, conforme AASHTO 2001 – GREENBOOK, pg. 260, 4ª edição. Assim a EQUAÇÃO 2 se transforma na EQUAÇÃO 3 abaixo, que fornece a aceleração na curva descendente, descontado o efeito do atrito de rolamento:

$$a = 0,0981 \cdot (i - 1,2)$$

EQUAÇÃO 3

Onde: **g** = aceleração da gravidade (9,81 m/s²)
i = declividade longitudinal ou “greide” em %
a = **aceleração do movimento descendente**

Aplicando da cinemática a Equação de Torricelli, obtemos a fórmula do acréscimo de velocidade na curva descendente:

$$V = \sqrt{(V_R)^2 + 2 \cdot a \cdot d} = \sqrt{(V_R)^2 + 0,196 \cdot (i - 1,2) \cdot d}$$

EQUAÇÃO 4

Onde: **a** = aceleração do movimento descendente
d = desenvolvimento (comprimento) da curva
V_R = velocidade de projeto da curva [m/s]
V = **velocidade final descendente [m/s]**

Segundo AASHTO 2001 – GREENBOOK, pg. 261, 4ª edição, o efeito do arrasto aerodinâmico (resistência do vento) é notável apenas para velocidades superiores a 80 km/h, sendo desconsiderado abaixo de 30 km/h.

O arrasto aerodinâmico provoca desaceleração do veículo, de acordo com a seguinte equação:

$$F_R = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_x \cdot A \cdot V^2 = m \cdot a$$

EQUAÇÃO 5

Onde: **F_R** = força de arrasto aerodinâmico

ρ = densidade do ar = 1,29 kg/m³
 C_x = coeficiente de arrasto
 A = área de resistência ao vento [m²]
 V = velocidade do veículo [m/h]

Transformando as unidades para [km/h] e [kg], e adotando-se dois tipos distintos de veículos – AUTOMÓVEL TIPO ($A = 2\text{m}^2$; $m = 1000\text{ kg}$; $C_x = 0,35$) e CAMINHÃO TIPO ($A = 9\text{m}^2$; $m = 40.000\text{kg}$; $C_x = 0,90$), obtêm-se duas equações para a desaceleração provocada pelo arrasto aerodinâmico:

DESACELERAÇÃO AERODINÂMICA DO AUTOMÓVEL TIPO:

$$a_{R- \text{AUTOMÓVEL}} = 0,00045 \cdot V^2 \quad \text{EQUAÇÃO 6}$$

Onde: $a_{R- \text{AUTOMÓVEL}}$ = desaceleração aerodinâmica [m/s²]
 V = velocidade [m/s]

DESACELERAÇÃO AERODINÂMICA DO CAMINHÃO TIPO:

$$a_{R- \text{CAMINHÃO}} = 0,00013 \cdot V^2 \quad \text{EQUAÇÃO 7}$$

Onde: $a_{R- \text{CAMINHÃO}}$ = desaceleração aerodinâmica [m/s²]
 V = velocidade [m/s]

A razão entre as acelerações do AUTOMÓVEL TIPO e do CAMINHÃO TIPO é:

$$a_{R- \text{AUTOMÓVEL}} \div a_{R- \text{CAMINHÃO}} = 3,5 \quad \text{EQUAÇÃO 8}$$

Essa notável diferença de arrasto aerodinâmico entre os veículos tipo escolhidos faz com que o “freio aerodinâmico” em caminhões carregados seja 3,5 vezes menor do que nos automóveis. O freio aerodinâmico produz como decorrência uma velocidade limite de equilíbrio, para cada tipo de veículo e para cada diferente declividade longitudinal considerada, com a seguinte equação:

$$F_R = m \cdot a \quad \text{EQUAÇÃO 9}$$

Onde: F_R = força de arrasto aerodinâmico – Equação 5
 a = aceleração – Equação 3
 m = massa do veículo [kg]

Aplicando-se as grandezas características de cada veículo – AUTOMÓVEL TIPO e CAMINHÃO TIPO – obtêm-se as equações de velocidade limite de equilíbrio cada diferente declividade longitudinal considerada:

$$V_{\text{LIMITE - CAMINHÃO}} = \sqrt{751,7 (i - 1,2)}$$

$$V_{\text{LIMITE - Automóvel}} = \sqrt{218,0 (i - 1,2)}$$

EQUAÇÃO 10 – CAMINHÃO TIPO

EQUAÇÃO 11 – AUTOMÓVEL TIPO

VELOCIDADES DE EQUILÍBRIO EM CURVA DESCENDENTE				
CAMINHÃO-TIPO E AUTOMÓVEL-TIPO				
Declividade longitudinal	CAMINHÃO TIPO		AUTOMÓVEL TIPO	
	[m/s]	[km/h]	[m/s]	[km/h]
4%	46,9	165	25	89
6%	60,0	216	32	116
8%	72,0	257	39	139

A TABELA 2 explicita as enormes velocidades limite alcançadas pelo CAMINHÃO TIPO em curvas descendentes, demonstrando ser irrelevante, para caminhões carregados, o efeito redutor de velocidade devido ao arrasto aerodinâmico.

CÁLCULO DO AUMENTO DA VELOCIDADE NA CURVA DESCENDENTE

Para verificação do efeito de aumento de velocidade devido à declividade longitudinal das curvas, para cada raio e velocidade, o presente trabalho irá considerar curvas de 90^0 – noventa graus (um quarto de círculo = $2 \pi R \div 4$). Na prática da regulamentação, cada curva descendente deverá ser calculada com base no seu raio, ângulo, sobrelevação transversal e declividade longitudinal.

Nas tabelas que seguem, $V_{PROJETO}$ é a velocidade de projeto da curva, R_{MIN} é o raio mínimo da curva para a declividade transversal e_{MAX} considerada. Os valores dessas variáveis foram obtidos da TABELA 1.

A EQUAÇÃO 4 anteriormente obtida será utilizada para o cálculo da velocidade final.

As tabelas que seguem não consideram o efeito redutor do arrasto aerodinâmico, posto que esse fenômeno é proporcional ao quadrado da velocidade, o que não é o caso da velocidade do movimento acelerado na curva descendente. Os resultados serão cotejados com as velocidades limites para automóveis e caminhões (TABELA 2), e serão objeto de comentários. Os valores de velocidade calculados nas tabelas que seguem ficarão limitados às velocidades limites para a curva e o veículo tipo considerado.

Declividade transversal	Velocidade de Projeto	Raio Mínimo da curva	Desenvolvimento 90°	Velocidade Final na curva, sem frenagem e sem arrasto.			Velocidade Inicial para descida da curva sem frenagem		
				i = 4%	i = 6%	i = 8%	i = 4%	i = 6%	i = 8%
(e)	(km/h)	(m)	(m)						
0,04	30	35	55	36	40	43	24	20	17
0,04	40	60	94	48	52	57	32	28	23
0,04	60	150	236	73	80	88	47	40	32
0,04	80	280	440	98	108	118	62	52	42
0,04	90	375	589	111	124	135	69	56	45
0,04	110	635	997	139	156	171	81	64	49
0,06	30	30	47	35	38	41	25	22	19
0,06	40	55	86	47	52	56	33	28	24
0,06	60	135	212	71	79	85	49	41	35
0,06	80	250	393	96	106	115	64	54	45
0,06	90	335	526	109	120	131	71	60	49
0,06	110	560	879	135	151	165	85	69	55
0,08	30	47	74	38	42	47	22	18	13
0,08	40	79	124	50	56	61	30	24	19
0,08	60	196	308	76	86	94	44	34	26
0,08	80	361	567	102	115	127	58	45	33
0,08	90	479	752	116	131	145	64	49	35
0,08	110	785	1232	144	165	183	76	55	37

TABELA 3: VELOCIDADES EM CURVAS DESCENDENTES DE 90°, CONSIDERANDO ATRITO DE ROLAMENTO, SEM FRENAGEM DO VEÍCULO.

As velocidades estão indicadas em [km/h], os raios e os desenvolvimentos (percursos) estão indicados em [m], e as três primeiras colunas da TABELA 3 foram transcritas da TABELA 1.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA A REGULAMENTAÇÃO DE VELOCIDADE EM CURVAS DESCENDENTES – CAMINHÕES

O benéfico efeito redutor de velocidade do arrasto aerodinâmico é desprezível para caminhões carregados em curvas descendentes, os quais alcançam velocidades de equilíbrio incompatíveis com a segurança, já a partir de 4% de declividade longitudinal. Considerando a instabilidade direcional e o momento de tombamento lateral que a frenagem em curva provoca especialmente em veículos de carga, com elevado centro de gravidade, as curvas descendentes com declividades iguais ou superiores a 4% deverão receber regulamentação de velocidade inferior à velocidade de projeto da curva, descontando o montante resultante da aceleração na curva descendente. Cada curva deverá ser assim calculada, considerando sua extensão e declividade longitudinal, segundo a metodologia aqui desenvolvida.

Para evitar que a regulamentação de velocidade para caminhões fique muito abaixo da velocidade de projeto da curva, pode-se admitir a frenagem suave para caminhões, inferior a $0,5 \text{ m/s}^2$ ao longo do percurso descendente (estudar cada caso), sem que isso implique em desequilíbrio na curva. Se for utilizada, essa desaceleração adicional deve ser inserida na EQUAÇÃO 4 anterior.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA A REGULAMENTAÇÃO DE VELOCIDADE EM CURVA DESCENDENTES – AUTOMÓVEIS

Para automóveis, é significativo o efeito benéfico do arrasto aerodinâmico na redução da velocidade. Essa condição, aliada à melhor dirigibilidade e estabilidade dos automóveis, que aceitam frenagem moderada em curvas, tornam menos perigoso o efeito acelerador das curvas descendentes. Assim, apenas curvas descendentes com declividade igual ou superior a 6% devem ser regulamentadas com velocidades máximas inferiores às velocidades de projeto da curva, o que deve ser feito segundo a metodologia desenvolvida neste trabalho.

Para evitar que a regulamentação de velocidade para automóveis fique muito abaixo da velocidade de projeto da curva, pode-se admitir a frenagem para automóveis da ordem de $0,5 \text{ m/s}^2$ ao longo do percurso descendente (estudar cada caso), sem que isso implique em desequilíbrio ou desconforto na curva. Se for utilizada, essa desaceleração adicional deve ser inserida na EQUAÇÃO 4 anterior.

SERGIO EJZENBERG: Engenheiro Civil graduado pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo em 1975, com especialização em Tráfego e Transportes pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (1977/78) e pela ACTIM - Agência para a Promoção Internacional das Tecnologias e das Empresas Francesas (1983 e 1997). Trabalhou na CET/SP durante 15 anos, primeiramente como engenheiro de tráfego, e depois como consultor, até 1996. Atualmente trabalha como consultor de Engenharia de Tráfego e Segurança Viária, treinamento em engenharia, operação e fiscalização de trânsito, e como perito em investigação de acidentes de trânsito. Contato: ejzenberg@ejzenberg.com.br.

RENATA EJZENBERG: Aluna do curso de Engenharia Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.