

Universidade Regional do Cariri – URCA

Pró – Reitoria de Ensino de Graduação
Coordenação da Construção Civil
Disciplina: Estradas I



Conforto e Segurança na Curva Horizontal

Superelevação, Superlargura e Distância de Visibilidade

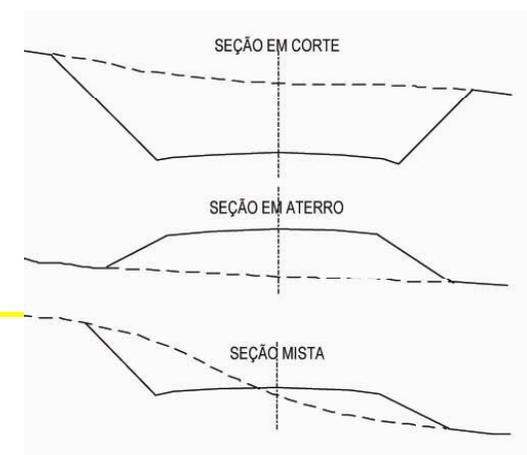
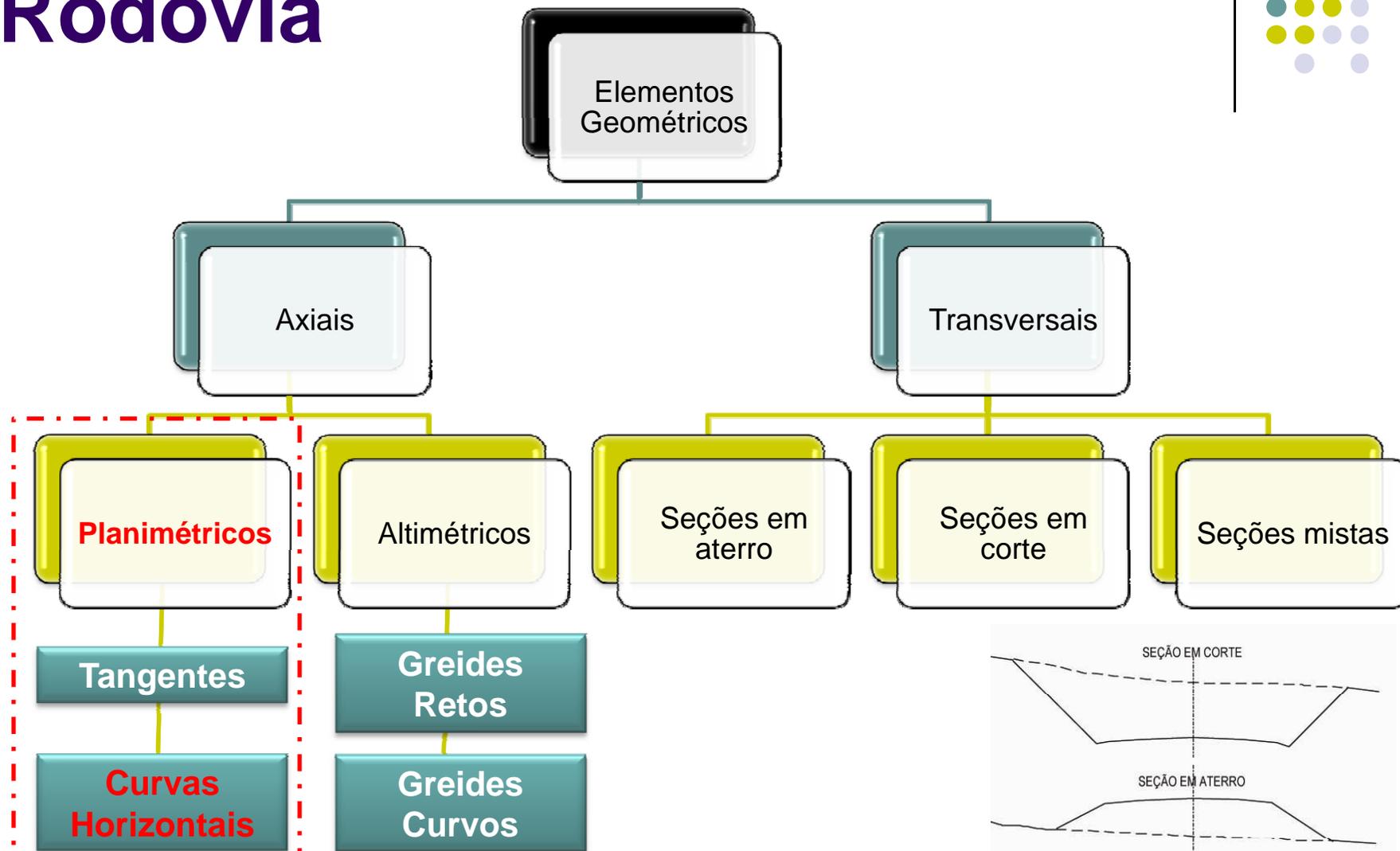
Renato de Oliveira Fernandes

Professor Assistente

Dep. de Construção Civil/URCA

renatodeof@gmail.com

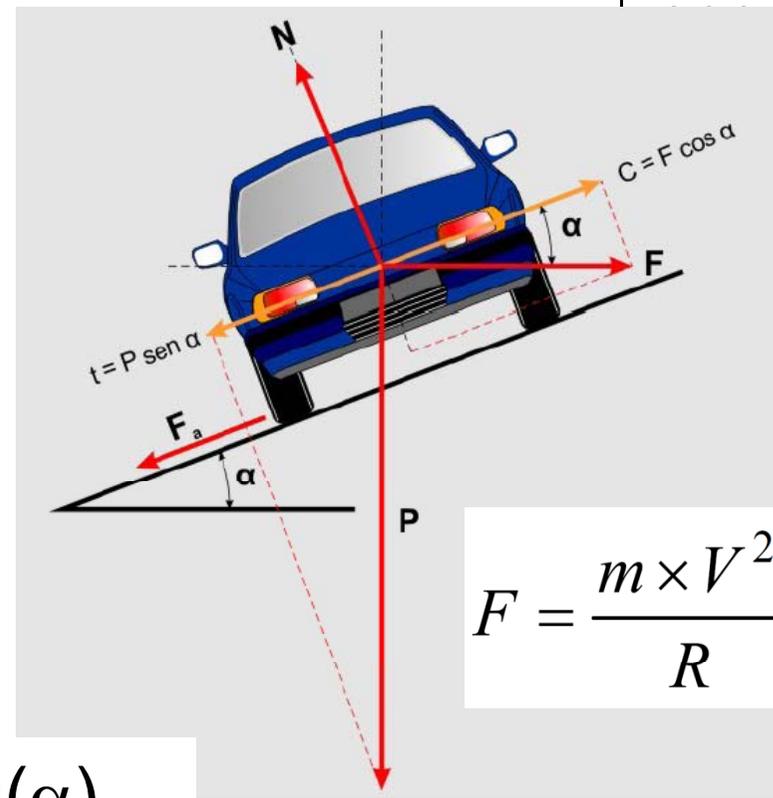
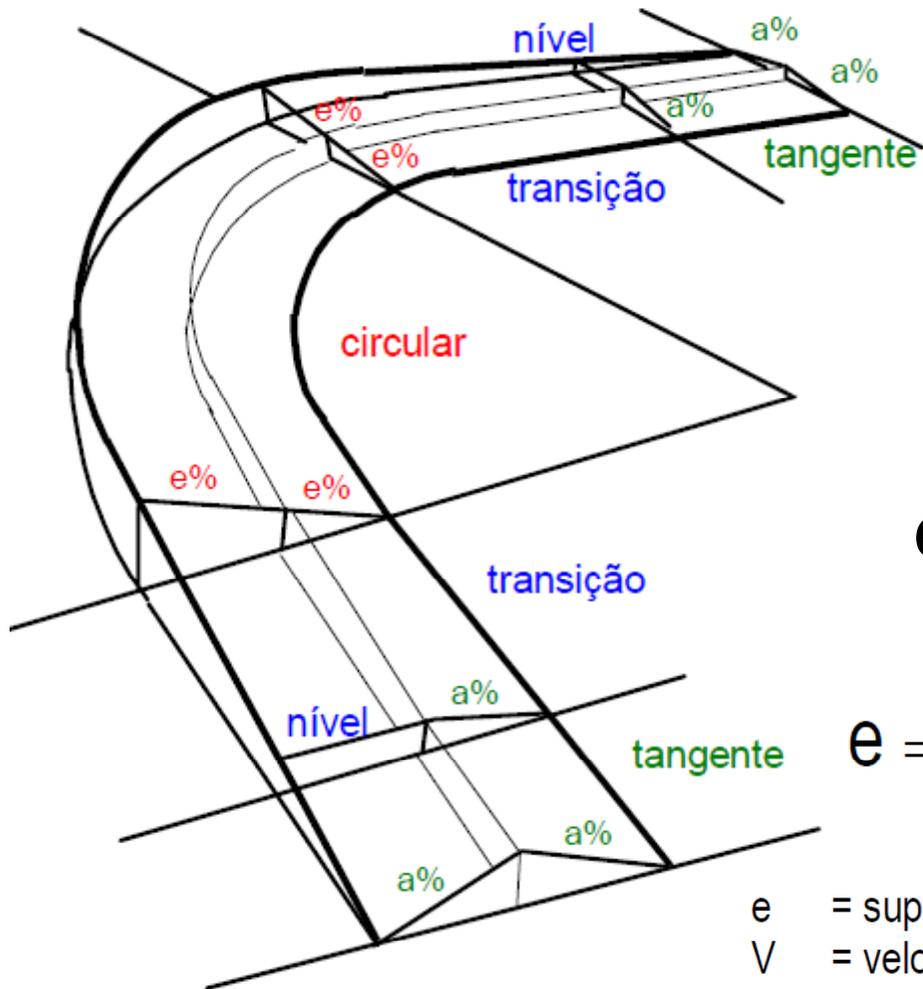
Elementos Geométricos da Rodovia



Superelevação



Superelevação



$$F = \frac{m \times V^2}{R}$$

$$e = \text{tg}(\alpha)$$

$$e = \frac{V^2}{127 \cdot R} - f$$

- e = superelevação (m/m);
- V = velocidade do veículo (km/h);
- R = raio da curva circular (m);
- f = coeficiente de atrito transversal, entre pneu e pavimento (m/m).



Superelevação

- valores máximos admissíveis do coeficiente f

V (km/h)	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
$f_{\text{máx}}$	0,20	0,18	0,16	0,15	0,15	0,14	0,14	0,13	0,12	0,11

Fonte: Manual de projeto geométrico de rodovias rurais (DNER, 1999, p. 71)

- valores de R que dispensam superelevação

V (km/h)	30	40	50	60	70	80	90	≥ 100
R (m)	450	800	1.250	1.800	2.450	3.200	4.050	5.000

Fonte: Manual de projeto geométrico de rodovias rurais (DNER, 1999, p. 97).

Raios mínimos das concordâncias horizontais



- São os menores raios das curvas que podem ser percorridas em **condições limite** com a **velocidade diretriz**, e à **taxa máxima de superelevação admissível**, em condições aceitáveis de segurança e de conforto de viagem.

$$R_{\min} = \frac{V^2}{127 \cdot (e_{\max} + f_{\max})}$$

V – velocidade diretriz (km/h)

e – superelevação (m/m)

f – coeficiente transversal entre o pneu e pavimento



Raios mínimos das concordâncias horizontais



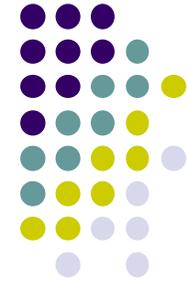
Velocidade de Projeto (km/h)		Valores de Raio Mínimo (m)									
		30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
Superelevação Máxima (%)	4	30	60	100	150	205	280	355	465	595	755
	6	25	55	90	135	185	250	320	415	530	665
	8	25	50	80	125	170	230	290	375	475	595
	10	25	45	75	115	155	210	265	345	435	540
	12	20	45	70	105	145	195	245	315	400	490

Fonte: Manual de Projeto Geométrico de Rodovias Rurais do DNER⁽¹⁾

$$R_{\min} = \frac{V^2}{127 \cdot (e_{\max} + f_{\max})}$$



Superelevação para raio de curva horizontal diferente do mínimo



$$e_R = e_{\text{máx}} \cdot \left(\frac{2 \cdot R_{\text{mín}}}{R} - \frac{R_{\text{mín}}^2}{R^2} \right)$$

e_R = superelevação a adotar para a concordância com raio de curva R (%);

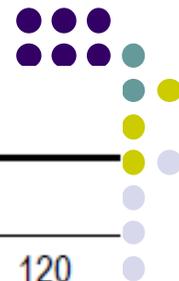
$e_{\text{máx}}$ = superelevação máxima admitida para a classe do projeto (%);

$R_{\text{mín}}$ = raio mínimo de curva para a velocidade diretriz considerada (m);

R = raio da curva circular utilizada na concordância (m).

Raios mínimos (m)						
REGIÃO	CLASSE 0	CLASSE I	CLASSE II	CLASSE III	CLASSE IVA	CLASSE IVB
PLANA	540	345	375	230	230	125
ONDULADA	345	210	170	125	125	50
MONTANHOSA	210	115*	80	50	50	25

(1) Somente para a Classe IA; para a classe IB, considerar 125 m.



VALORES DE SUPERELEVAÇÃO PARA $e_{\text{máx}} = 8 \%$

RAIOS (m)	VELOCIDADE DIRETRIZ (km/h)									
	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
31,86	7,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
50,58	6,0	8,0	-	-	-	-	-	-	-	-
61,41	5,2	7,7	-	-	-	-	-	-	-	-
95,50	3,6	6,2	7,8	-	-	-	-	-	-	-
122,81	2,9	5,2	7,0	-	-	-	-	-	-	-
132,25	2,7	4,9	6,8	8,0	-	-	-	-	-	-
156,29	2,4	4,3	6,1	7,7	-	-	-	-	-	-
191,01	2,0	3,6	5,3	7,0	7,9	-	-	-	-	-
245,57	2,0	2,9	4,4	6,1	7,2	8,0	-	-	-	-
286,49	2,0	2,5	3,8	5,5	6,7	7,7	-	-	-	-
343,79	2,0	2,2	3,3	4,8	6,0	7,1	7,8	-	-	-
381,98	2,0	2,0	3,0	4,4	5,5	6,7	7,5	8,0	-	-
429,73	2,0	2,0	2,7	4,0	5,1	6,3	7,2	7,9	-	-
491,12	2,0	2,0	2,4	3,6	4,6	5,7	6,7	7,6	8,0	-
572,97	2,0	2,0	2,1	3,1	4,0	5,1	6,0	7,0	7,8	-
687,56	2,0	2,0	2,0	2,6	3,5	4,5	5,3	6,3	7,2	7,9
1.145,93	2,0	2,0	2,0	2,0	2,2	2,9	3,5	4,4	5,3	6,2
2.062,66	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,1	2,6	3,3	3,9
3.437,75	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,1	2,5

$R_{\text{min}} = 170 \text{ m}$

Recomendação para uso de

$e_{\text{máx}}$



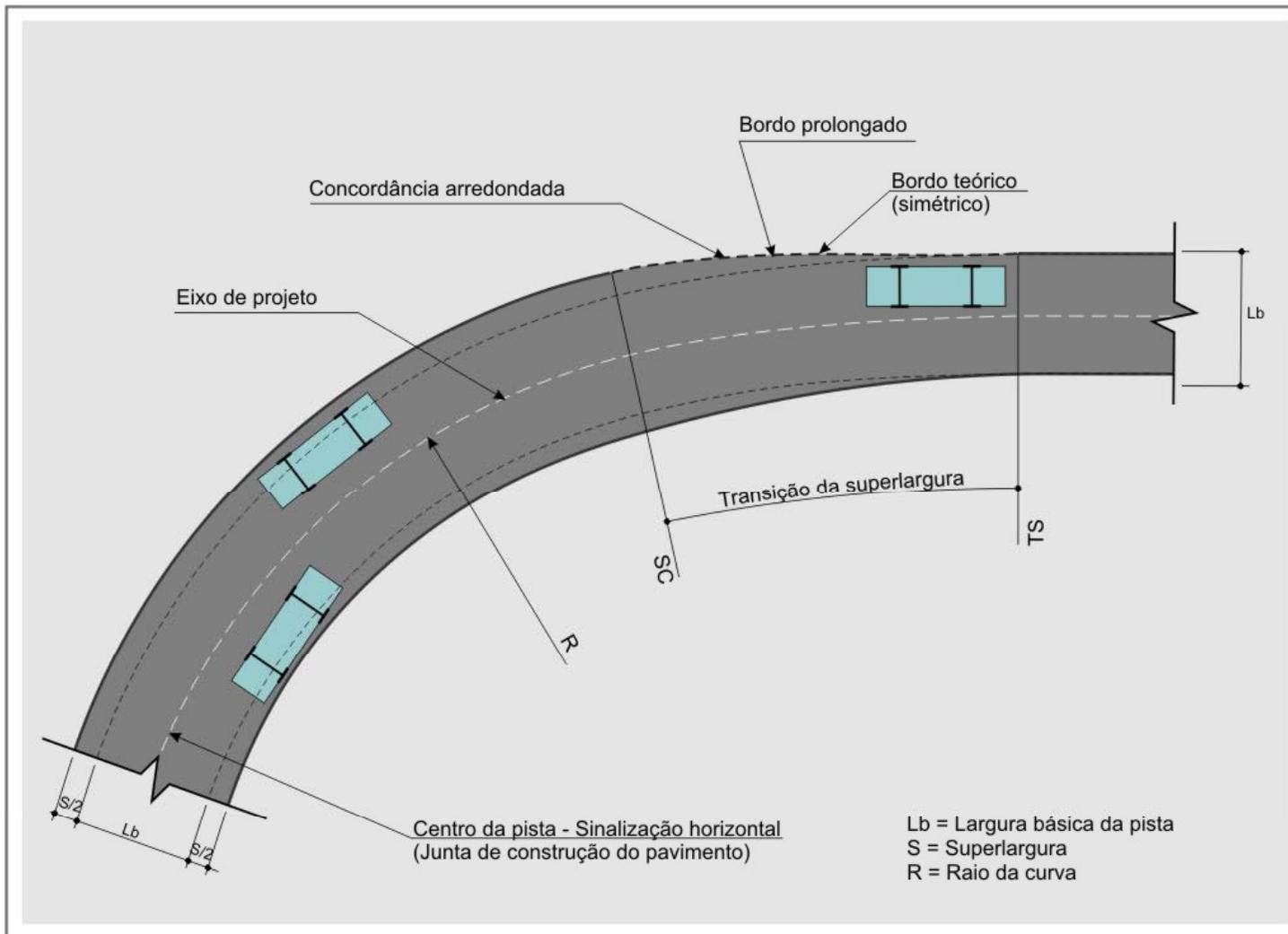
Taxas Máximas de Superelevação Admissíveis ($e_{\text{máx}}$)	
$e_{\text{máx}}$	Casos de Emprego
12%	Máximo absoluto em circunstância específicas;
10%	Máximo Normal. Adequado para fluxo ininterrupto. Adotar para Rodovias Classe 0 e Classe I em regiões planas e onduladas
8%	Valor superior normal. Adotar para rodovias Classe I em regiões montanhosas e rodovias das demais classes de projeto;
6%	Valor inferior normal. Adotar para projetos em áreas urbanizadas ou em geral sujeitando o tráfego a reduções de velocidade ou paradas.
4%	Mínimo. Adotar em situações extremas, com intensa ocupação do solo adjacente.

Taxas de superelevação máxima (%)

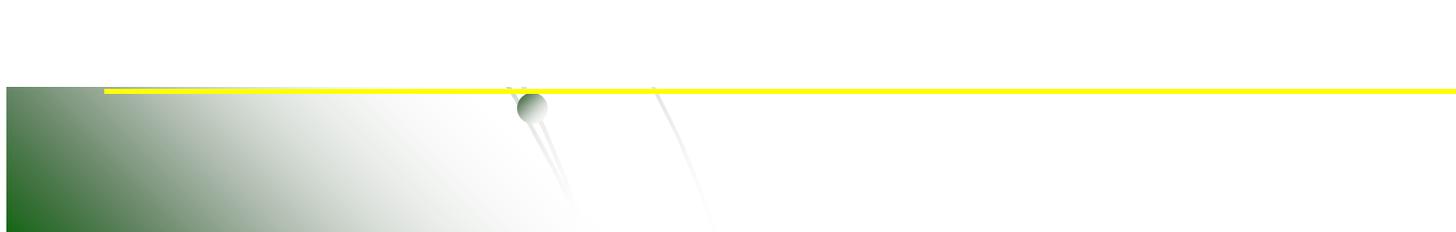


REGIÃO	CLASSE 0	CLASSE I	CLASSE II	CLASSE III	CLASSE IV
PLANA	10	10	8	8	8
ONDULADA	10	10	8	8	8
MONTANHOSA	10	10*	8	8	8

*SOMENTE PARA CLASSE IA, PARA CLASSE IB CONSIDERAR 8%



Superlarga



Superlargura

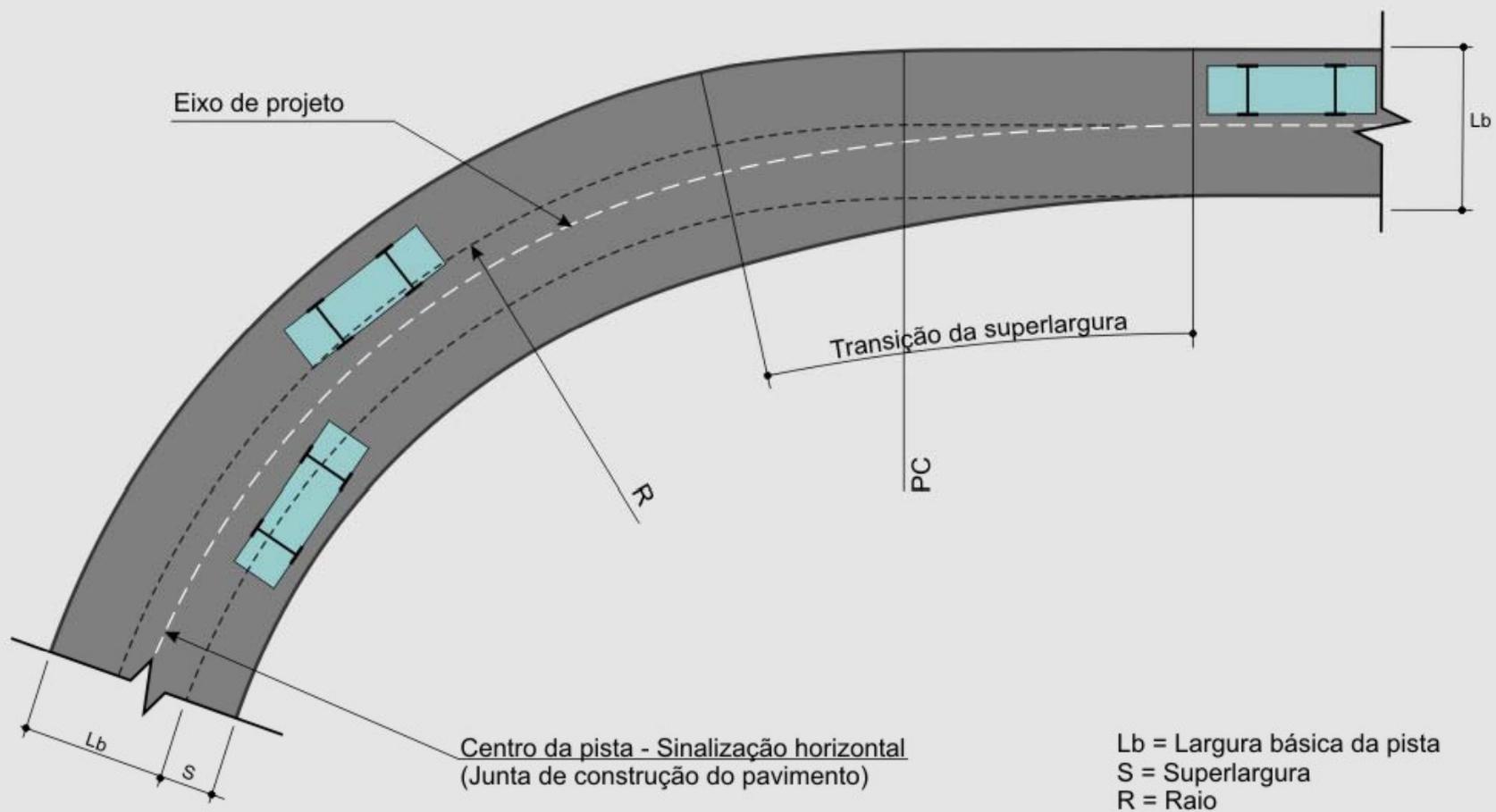


- **Justificativa**

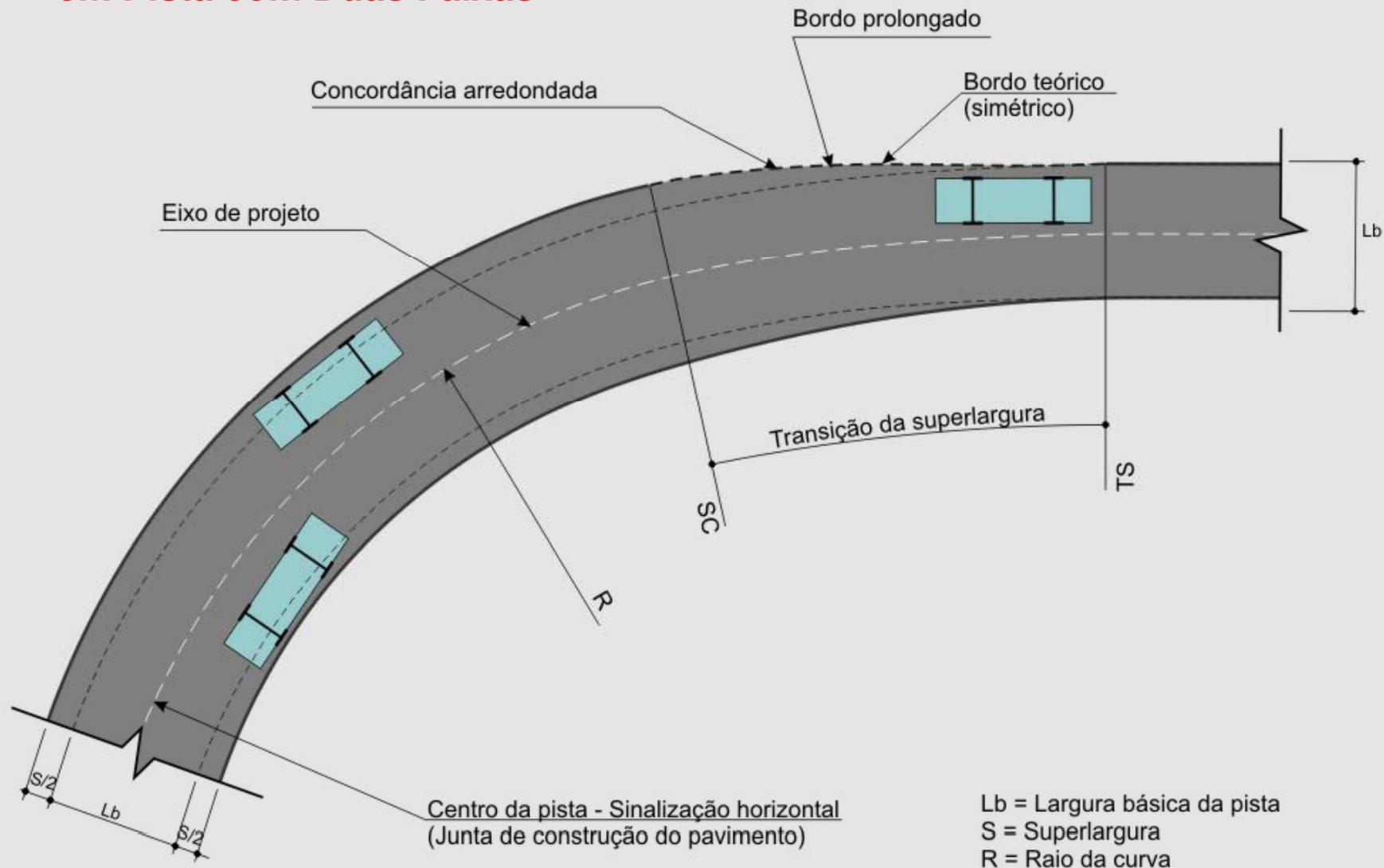
- O veículo percorre o trecho em curva circular mantendo seu eixo traseiro perpendicular à trajetória, ou seja, alinhado com o raio de curvatura;
- A roda dianteira externa descreve uma trajetória em curva circular, admitindo-se, para fins de simplificação, que o raio dessa trajetória seja igual ao raio da concordância horizontal (do eixo da rodovia);

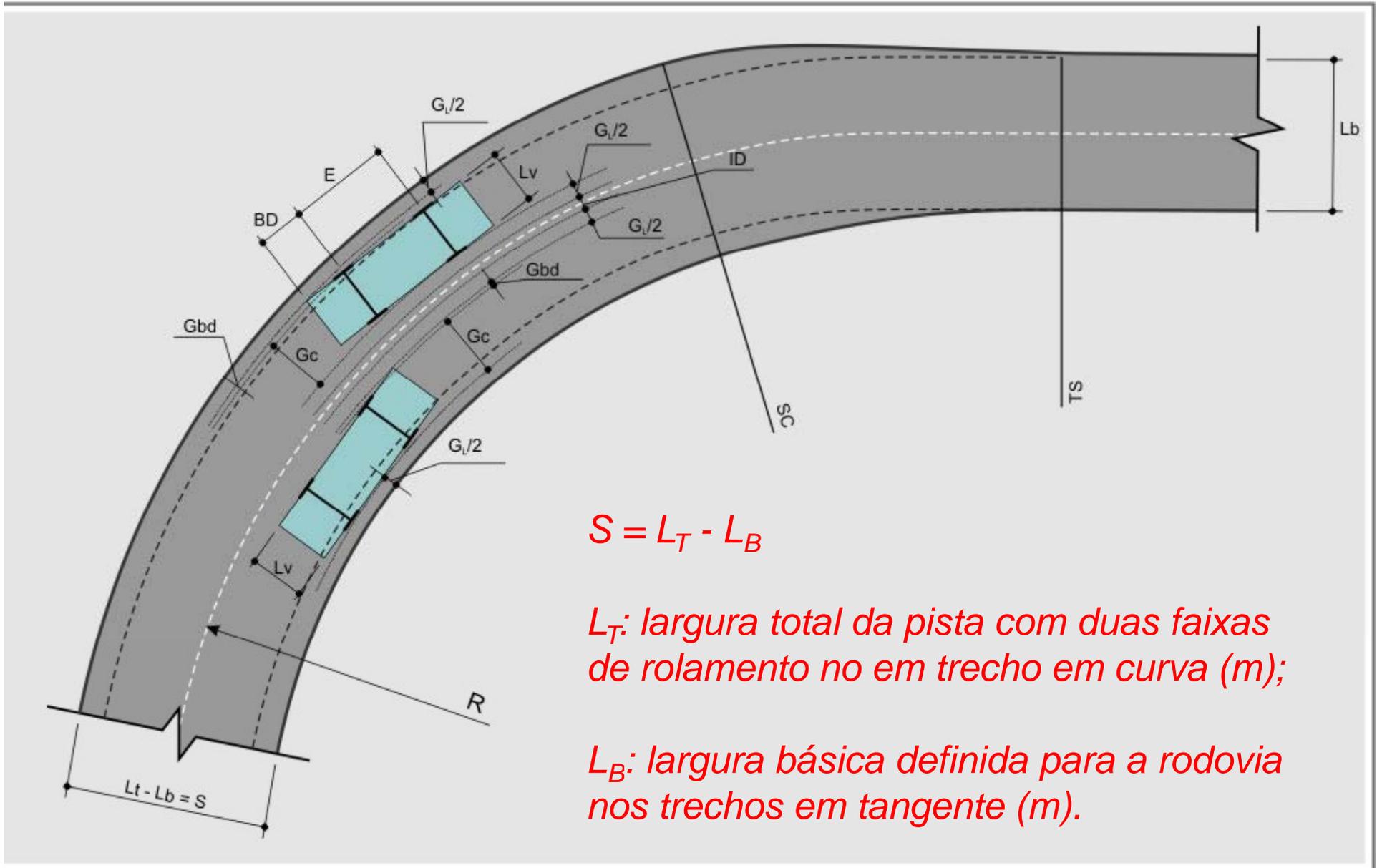


Disposição Assimétrica da Superlargura em Pista com Duas Faixas



Disposição Simétrica da Superlargura em Pista com Duas Faixas







$$L_T = (2 \times (G_C + G_L) + G_{BD}) + FD$$

Onde:

G_C : gabarito estático em curva do veículo de projeto considerado (m);

G_L : gabarito lateral ou folga do veículo de projeto considerado em movimento (m)

G_{BD} : gabarito requerido pelo percurso do balanço dianteiro do veículo de projeto em curva (m)

FD : folga dinâmica é a folga transversal adicional que considera a maior dificuldade de manutenção da trajetória do veículo em trechos de curva, determinada de forma experimental e empírica (m).

L_B (m)	G_L (m)
6,00 a 6,40	0,60
6,60 a 6,80	0,75
7,00 a 7,20	0,90

$$FD = \frac{V}{10 \times \sqrt{R}}$$

Fonte: Manual de Projeto Geométrico de Rodovias Rurais⁽¹⁾

L_B - largura da pista de rolamento

$$G_C = LV + \frac{E^2}{2 \times R}$$



Onde:

LV : largura física do veículo de projeto (m);

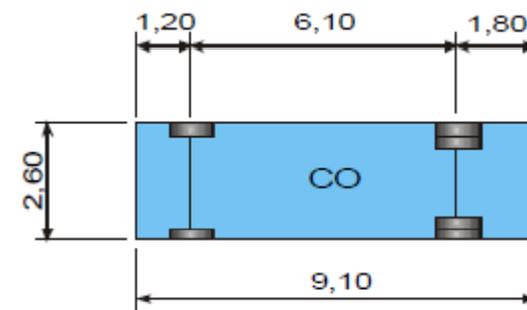
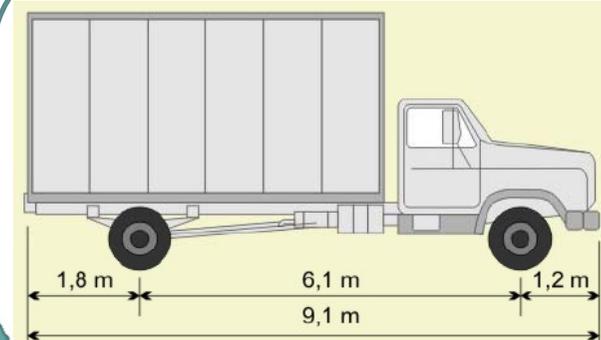
E : distância entre eixos do veículo de projeto (m);

R : raio da curva horizontal (m).

$$G_{BD} = \sqrt{R^2 + BD \times (2 \times E + BD)} - R$$

- $LV = 2,60$ m;
- $E = 6,10$ m;
- $BD = 1,20$ m;
- Sendo $LB = 7,20$ m , tem-se $G_L = 0,90$ m

Veículo CO



Valores dos raios acima dos quais é dispensável a superlargura

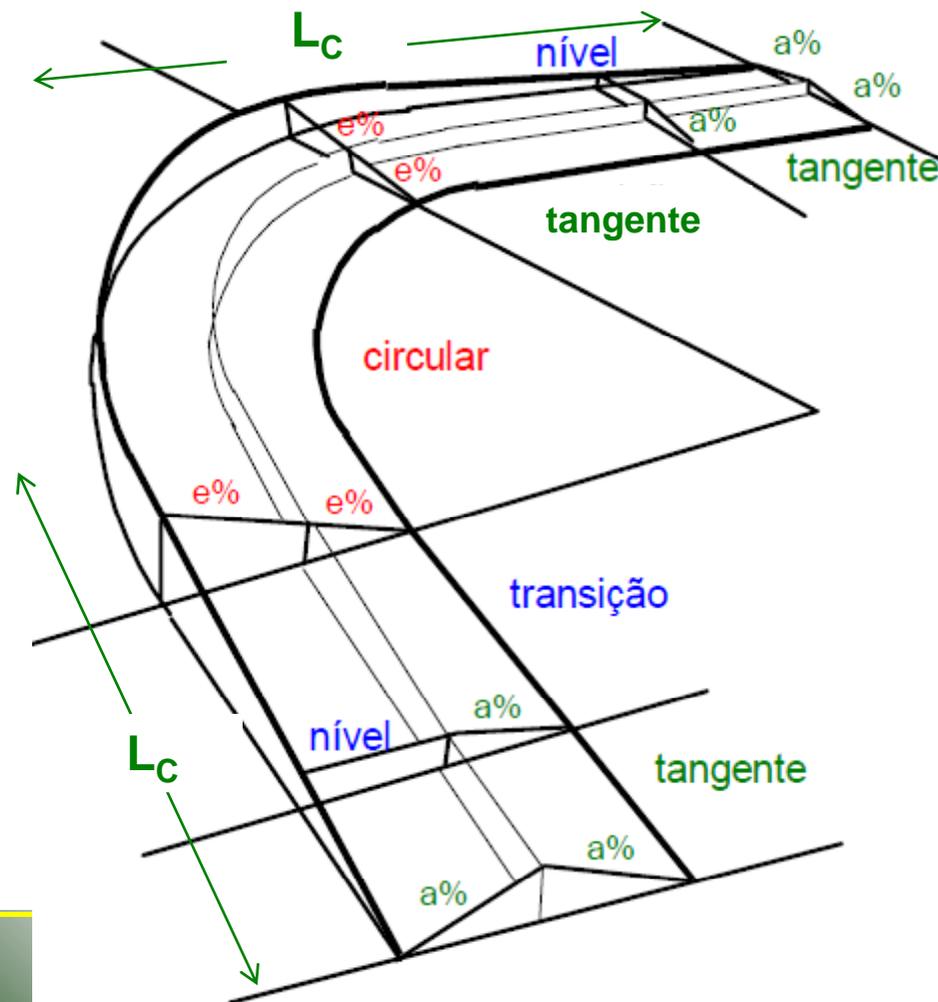


V (km/h)	30	40	50	60	70	80	90	100	Tipo de Veículo
R(m)	130	160	190	220	260	310	360	420	CO
R(m)	270	300	340	380	430	480	540	600	SR
	Largura básica da pista em tangente (LB) = 7,20 m								
R(m)	340	430	550	680	840	1000	-	-	CO
	Largura básica da pista em tangente (LB) = 6,60 m								

Fonte: Pontes Filho (1998)

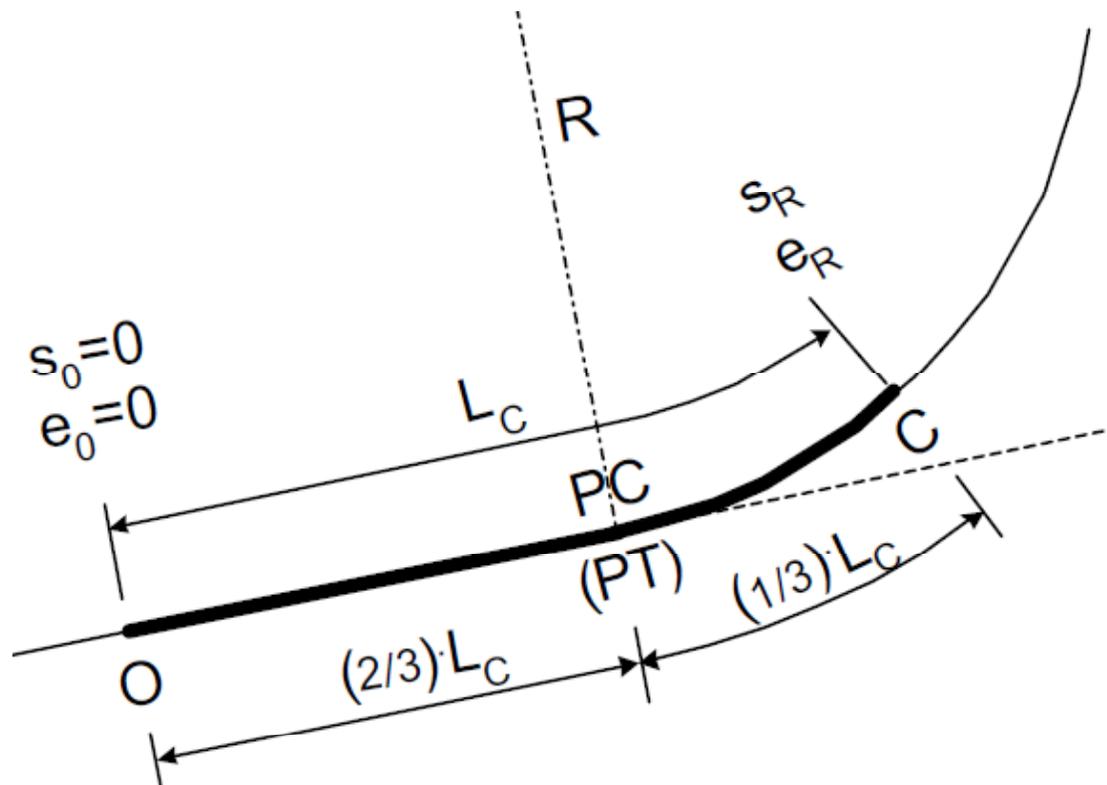
- Na prática adota-se múltiplos de 0,20 metros e valor mínimo de 0,40 metros para justificar a adoção da superlargura.
- Multiplicar os valores da superlargura por 1,25 no caso de pistas com três faixas de tráfego e por 1,50 no caso de pistas com quatro faixas.

Desenvolvimento da superelevação e superlargura



- A prática internacional tem demonstrado que um bom critério é assegurar que cerca de 60% a 70% da transição seja efetuada na **tangente** ou no **trecho de transição**, sendo a extensão restante completada **na curva circular**.

Desenvolvimento da superelevação e superlargura

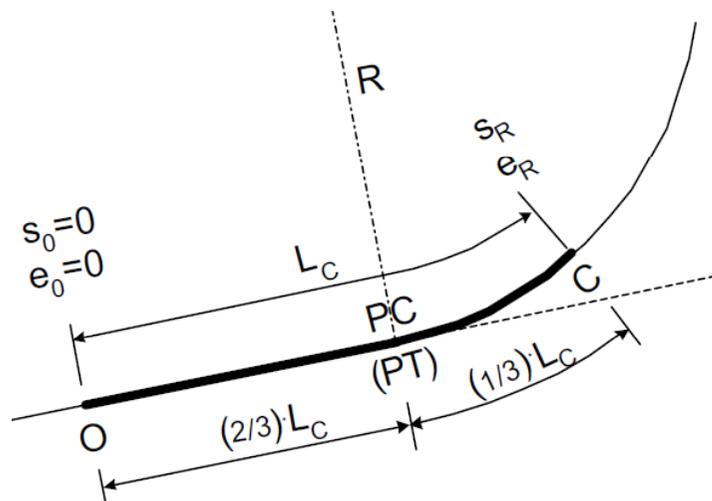


O posicionamento do comprimento de transição L_C deve ser feito para evitar comprimentos fracionários, fazendo, quando possível, que o início e o término da transição coincidam com estacas inteiras ou múltiplas de 10,00m.

Desenvolvimento da superelevação e superlargura



- O comprimento de transição (L_C) deve estar situado entre valores máximo (L_{max}) e mínimo (L_{min}).
- L_{min} :
 - **Critério do comprimento mínimo absoluto**



$$L_{min} = 0,56.V$$

V – velocidade em km/h

$$L_{min} > 30 \text{ m}$$

Desenvolvimento da superelevação e superlargura



- Critério da fluência ótica

$$L_{\min} = \frac{1}{9} \cdot R$$

onde:

L_{\min} : comprimento mínimo de transição para $R > 800\text{m}$ (m);
 R : raio da curva circular (m).

- Critério do conforto

$$L_{\min} = \frac{V^3}{46,656 \cdot C \cdot R} - \frac{e_R \cdot V}{0,367 \cdot C} \qquad C = 1,5 - 0,009 \cdot V$$

onde:

L_{\min} : comprimento mínimo de transição (m);
 V : velocidade diretriz (km/h);
 R : raio da curva circular (m);
 e_R : superelevação da curva circular (m/m);
 C : taxa (máxima admissível) de variação da aceleração transversal (m/s³).

Desenvolvimento da superelevação e superlargura



- Critério da máxima rampa de superelevação

$$L_{\min} = F_m \cdot L_F \cdot \frac{e_R}{r_{\max}}$$

onde:

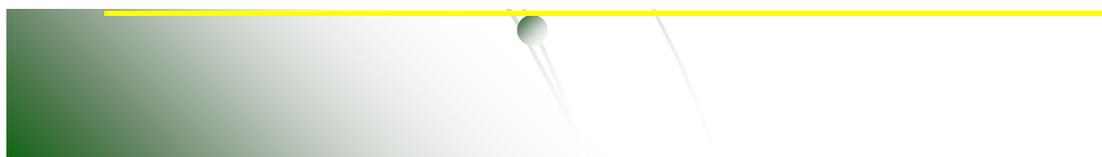
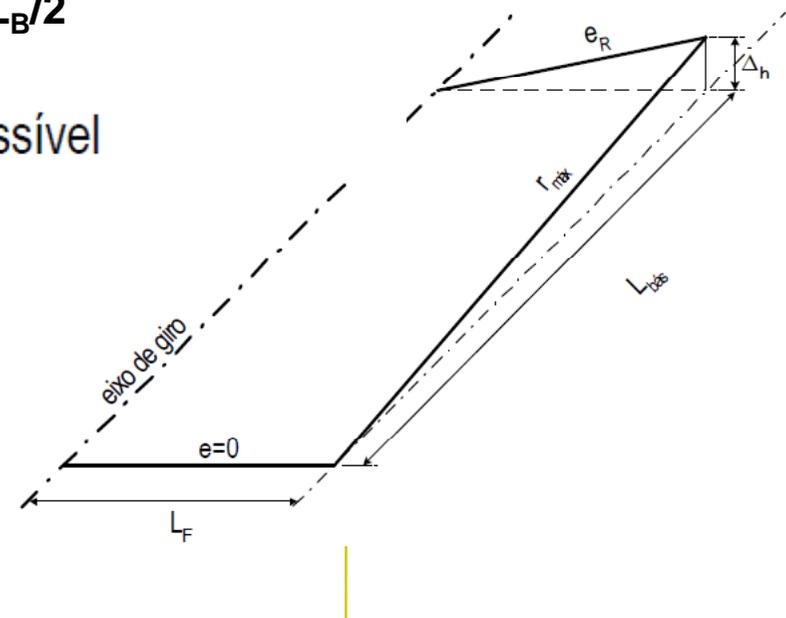
L_{\min} : comprimento mínimo de transição (m);

F_m : fator multiplicador em função da largura de rotação da pista

L_F : largura da faixa de trânsito (m); $L_F = L_B/2$

e_R : superelevação na curva circular (m/m);

r_{\max} : rampa de superelevação máxima admissível



Desenvolvimento da superelevação e superlargura



$$L_{\min} = F_m \cdot L_F \cdot \frac{e_R}{r_{\max}}$$

LARGURA DE ROTAÇÃO DA PISTA	FATOR MULTIPLICADOR (F_m)
Caso básico: giro de 1 faixa	1,0
Giro conjunto de 2 faixas	1,5
Giro conjunto de 3 faixas	2,0
Giro conjunto de 4 faixas	2,5

Fonte dos dados básicos: Manual de projeto geométrico de rodovias rurais (DNER, 1999, p. 108).

V (km/h)	40	50	60	70	80	90	≥100
r_{\max}	1 : 137	1 : 154	1 : 169	1 : 185	1 : 200	1 : 213	1 : 233

Fonte dos dados primários: DNER (1999, p.107)

Desenvolvimento da superelevação e superlargura



- **Comprimento máximo da transição (L_{\max})**
- Critério do tempo de percurso
 - O DNER estipula que o comprimento de transição seja limitado à distância percorrida por um veículo, durante um tempo $t = 8$ segundos, na velocidade diretriz.
 - Normalmente em curva circular simples $L = L_{\min}$

$$L_{\max} = 2,2 \cdot V$$

onde:

L_{\max} : comprimento máximo de transição (m);

V : velocidade diretriz (km/h).

Desenvolvimento da superelevação e superlargura



- Critério do máximo ângulo central da Clotóide

$$L_{\text{máx}} = R$$

onde:

$L_{\text{máx}}$: comprimento máximo de transição (m);

R : raio da curva circular (m).

Aplicado no caso em que a concordância é feita com uma clotóide para realizar a transição do trecho reto com a curva circular simples.





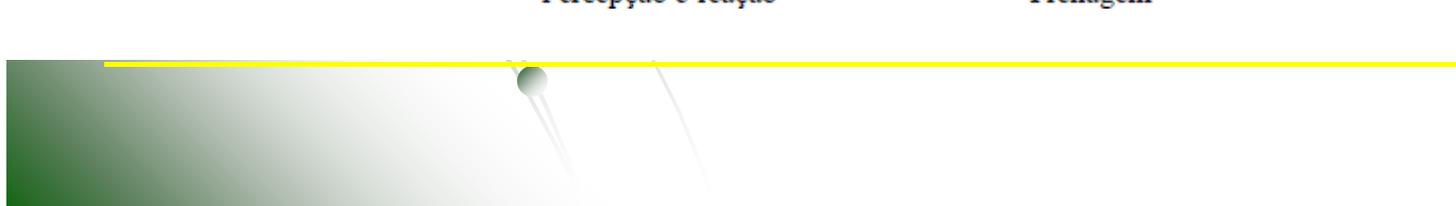
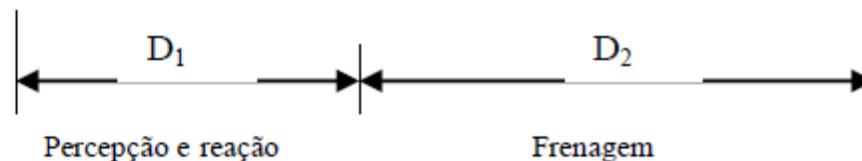
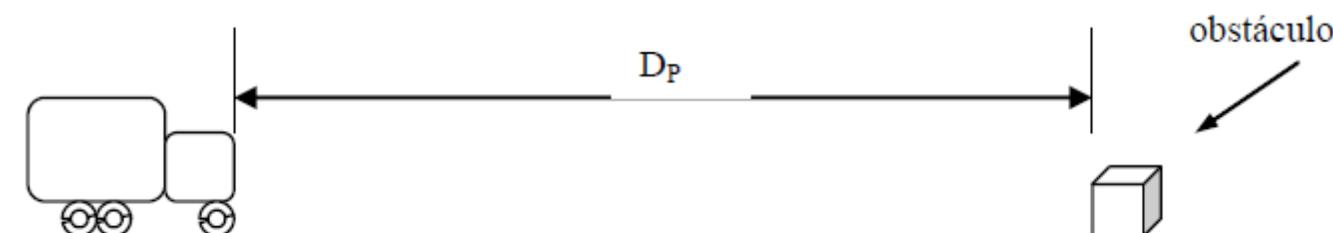
Distância de Visibilidade



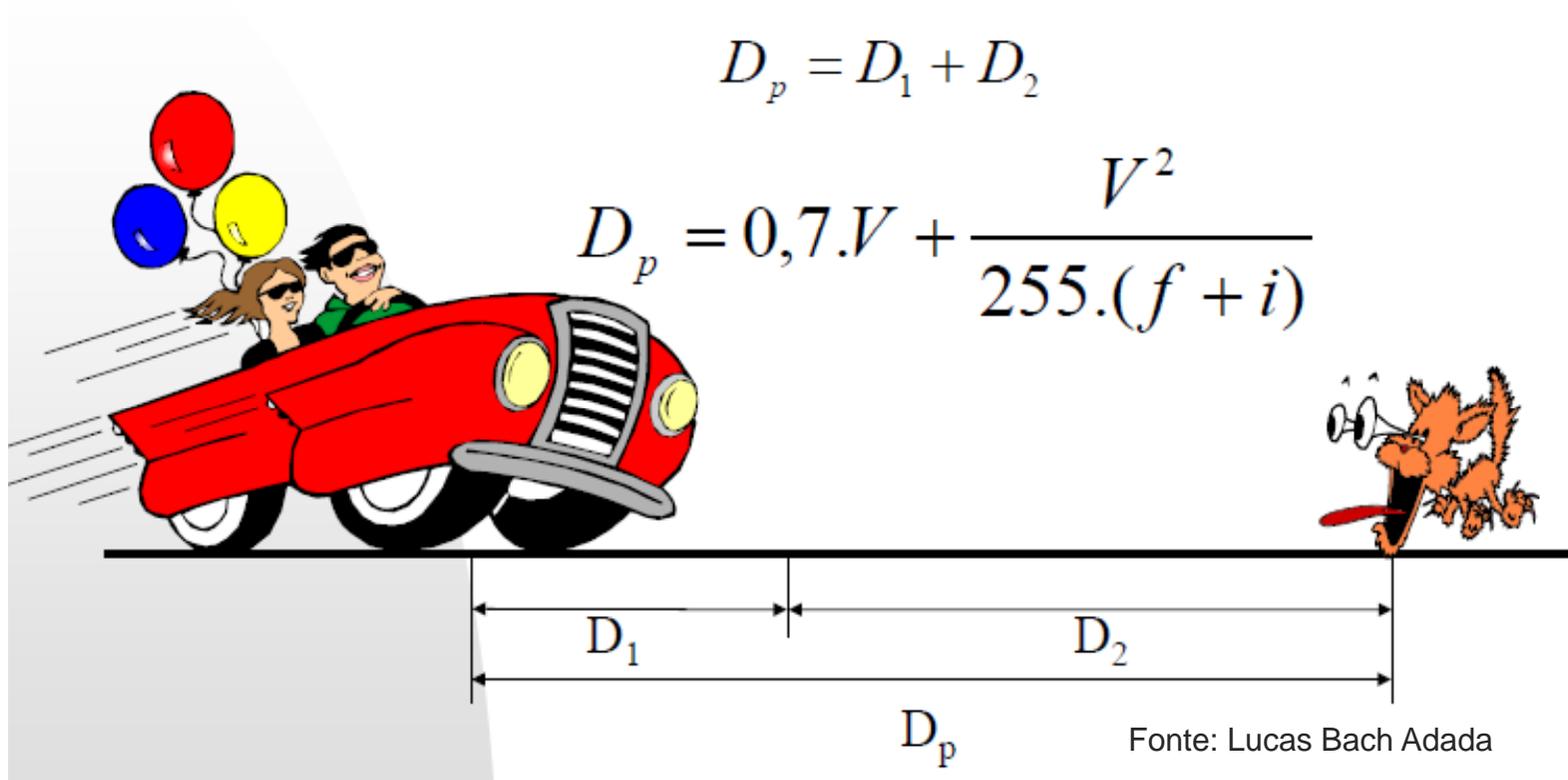
Distância de visibilidade de parada



- **Distância de Visibilidade de Parada (D_p)**
 - Distância para percepção e reação
 - Distância em frenagem



Distância de visibilidade de parada

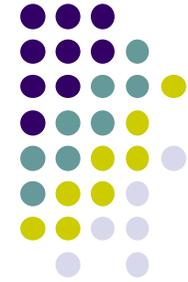


V – velocidade de projeto (km/h);

f – coeficiente de atrito longitudinal para frenagem;

i – inclinação longitudinal da pista (+ ou -)

Distância de visibilidade de parada

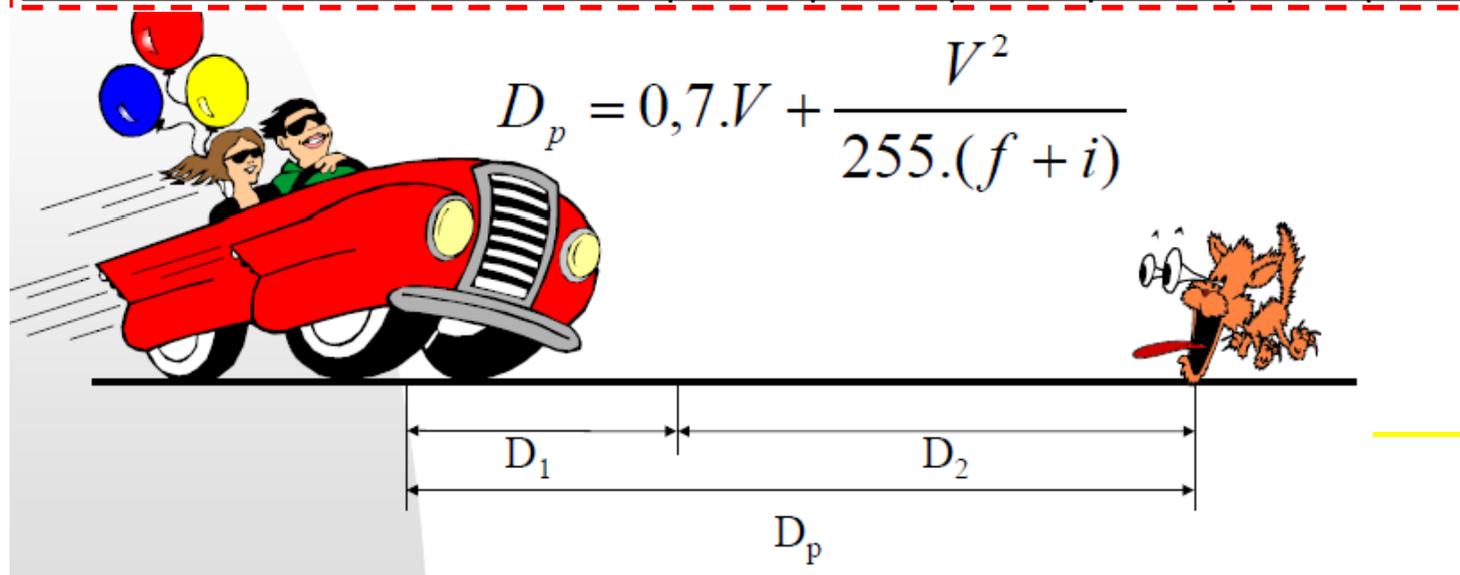


Distância de frenagem

Velocidade de projeto (km/h)	50	60	70	80	90	100	110
Distância de frenagem, D_2 (m)	50	65	81	98	118	138	162

Valores de coeficiente de atrito (f) adotados para projeto

Velocidade de projeto (km/h)	50	60	70	80	90	100	110	120	130
Pavimento seco	0,62	0,60	0,59	0,58	0,57	0,56	0,55	0,54	0,53
Pavimento molhado	0,36	0,34	0,32	0,31	0,31	0,30	0,30	0,29	0,28



Distância de visibilidade de parada



VELOCIDADES		COEFICIENTE DE ATRITO (f_L)		DISTÂNCIAS DE VISIBILIDADE DE PARADA ($i = 0\%$)	
Diretriz (V) Km/h	Média de Percurso (V_m) Km/h	Para V	Para V_m	DESEJÁVEL (para V) m	MÍNIMA (para V_m) m
30	30	0,40	0,40	30	30
40	38	0,38	0,39	45	45
50	46	0,35	0,36	65	60
60	54	0,33	0,34	85	75
70	62	0,31	0,33	110	90
80	70	0,30	0,31	140	110
90	78	0,30	0,30	175	130
100	86	0,29	0,30	210	155
110	92	0,28	0,30	255	180
120	98	0,27	0,29	310	205

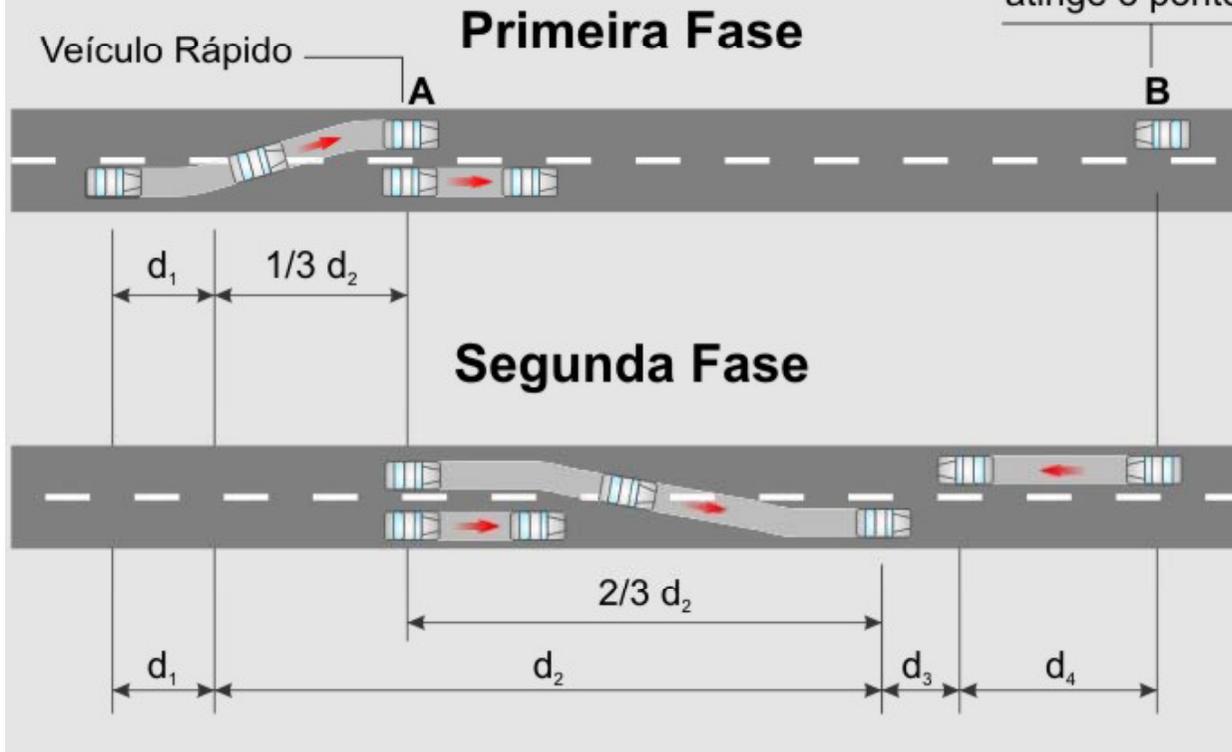
Fonte: Manual de projeto geométrico (DNER, 1999)

Distância de Visibilidade de Ultrapassagem



$$D_{VU} = d_1 + d_2 + d_3 + d_4$$

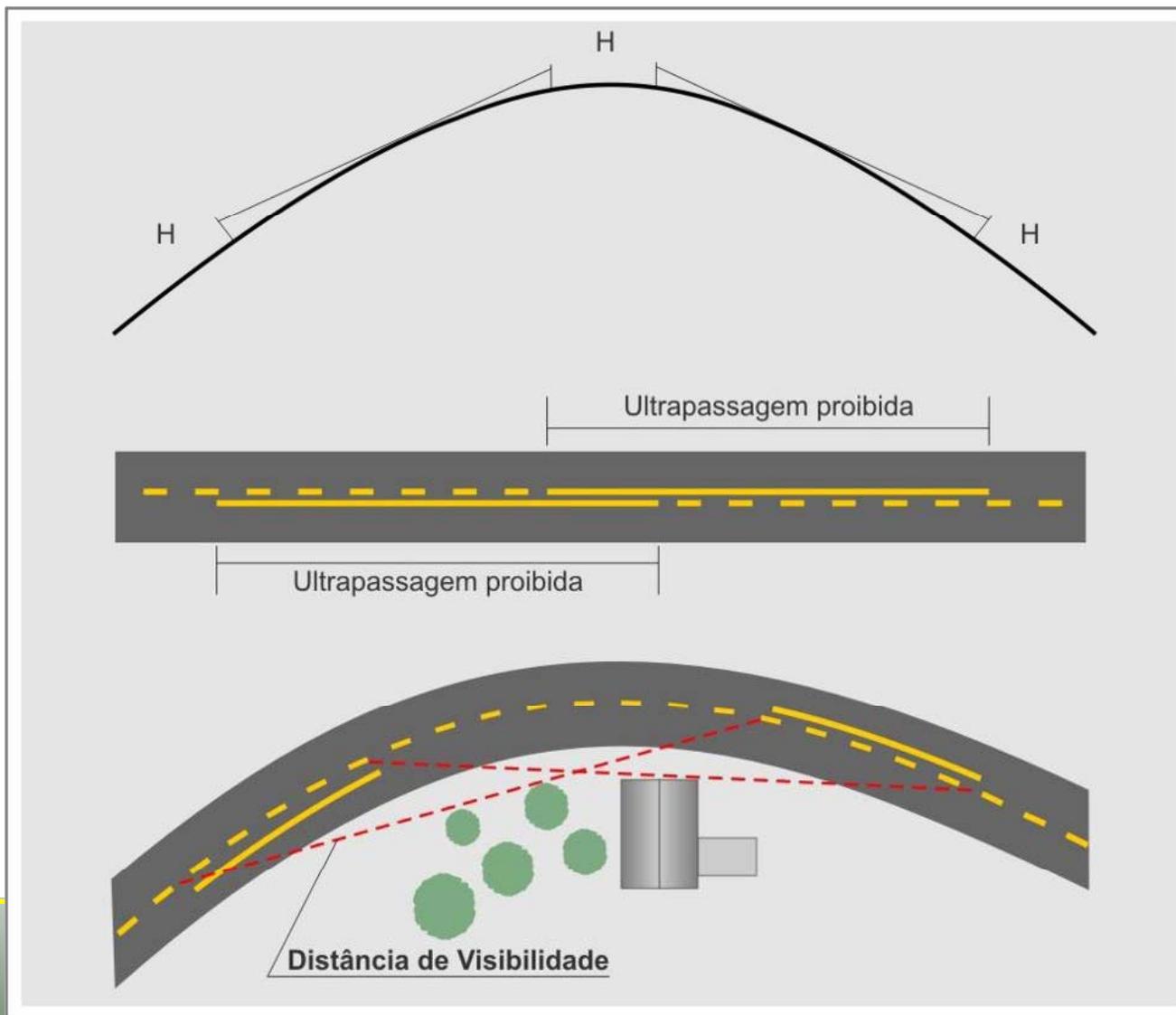
O veículo em sentido oposto surge quando o veículo rápido atinge o ponto A.



Valores de Projeto Estabelecidos pelo DNER para as Distâncias de Visibilidade de Ultrapassagem

Velocidade Diretriz (km/h)	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
Dist. Visibilidade de Ultrapassagem (em metros)	180	270	350	420	490	560	620	680	730	800

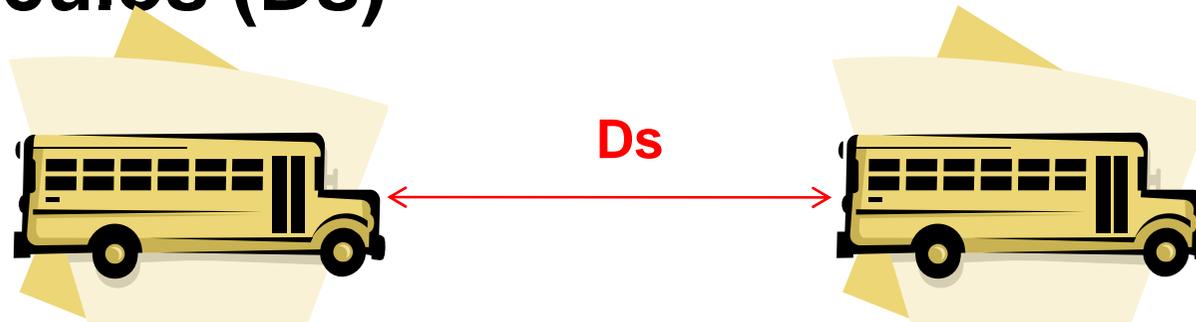
Verificação da Distância de Visibilidade Disponível ao Longo da Rodovia





Mantenha distância!

- **Distância de Segurança entre dois Veículos (D_s)**



$$D_s = V_p \cdot t_r + K \cdot V_p^2 + c$$

$t_r = 0,75$ s (motorista atento, próximo ao veículo da frente)

$k = 0,003$ (diferentes desacelerações: o veículo de trás não percebe, de imediato, a intensidade da frenagem do veículo que vai à frente)

$c = 8$ m (comprimento do veículo adotado)

V_p – Velocidade de projeto (km/h)