1- RAIO MÍNIMO DE CURVATURA HORIZONTAL

Os raios mínimos de curvatura horizontal 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.

Um veículo em trajetória circular é forçado para fora da curva pela centrífuga. Esta força é compensada pela componente do peso do veículo devido a superelevação da curva e pelo atrito lateral entre os pneus e a superfície do pavimento, como mostra a figura 1. Para simplificação do raciocínio, vamos supor as forças aplicadas no centro de gravidade do veículo.

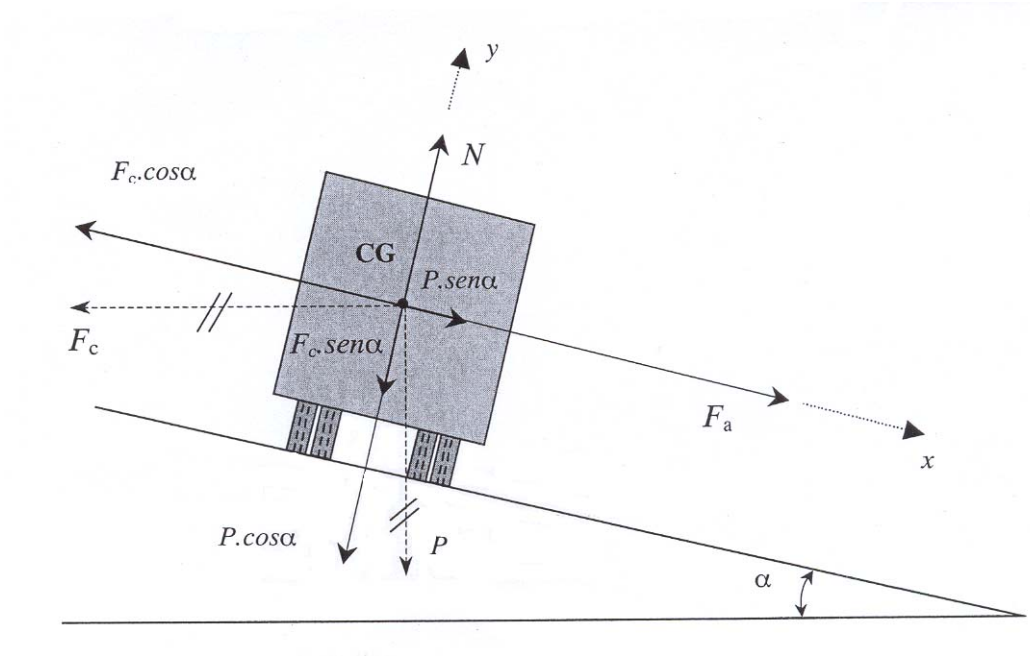


Figura 1 – forças atuantes num veículo em curva.

De acordo como o esquema de forças da figura 1, temos:

$$F_c \cdot \cos\alpha = P \cdot \operatorname{sen}\alpha + F_a \qquad (1)$$

$$\frac{m \cdot V^2}{R_c} \cdot \cos\alpha = P \cdot \operatorname{sen}\alpha + f \cdot N \qquad (2)$$

$$\frac{m \cdot V^2}{R_c} \cdot \cos\alpha = m \cdot g \cdot \operatorname{sen}\alpha + f \cdot (P \cdot \cos\alpha + F_c \cdot \operatorname{sen}\alpha) \qquad (3)$$

Como o ângulo α é pequeno, podemos considerar, sem erro apreciável do ponto de vista prático, sen α ≅ tan α e cos α ≅ 1, logo a equação 3 fica:

$$\frac{V^2 \cdot (1 - f \cdot \tan\alpha)}{g \cdot R_c} = \tan\alpha + f \qquad (4)$$

Nos casos normais de rodovias rurais, o coeficiente de atrito (f) e o valor e = tan α (superelevação) são pequenos, de modo que o produto f . tan α = 0, a equação 4 se reduz a:

$$R_c = \frac{v2}{g \cdot (e + f)} \qquad (5)$$

Nas unidades usuais, ou seja, R_c em metros, V em km/h e g = 9,8 m/s², temos:

$$Rc = \frac{(V/3,6)^2}{9,8 \cdot (e + f)} \qquad (6)$$

$$R_c = \frac{V^2}{127 \cdot (e + f)} \qquad (7)$$

Essa fórmula exprime a relação geral entre valores quaisquer de raio da curva, superelevação, velocidade e o correspondente coeficiente de atrito transversal. Deve ser observado que o termo (e + f) exprime uma soma algébrica, em que a superelevação pode ser positiva ou negativa (conforme a declividade da pista tenha caimento para o lado interno ou externo da curva, respectivamente).

O mesmo acontece ao coeficiente de atrito transversal (conforme o seu sentido de atuação se oriente para o lado interno ou externo da curva, respectivamente). Em velocidades inferiores à velocidade ótima (velocidade que não desenvolve atrito transversal pneu/pavimento), o veículo tende a se deslocar para o centro da curva, ou seja, o coeficiente f torna-se negativo.

Adotando-se simultaneamente os valores máximos admissíveis para a superelevação e para o coeficiente a de atrito transversal, pode-se calcular o valor do raio mínimo admissível, para uma dada velocidade. A expressão para cálculo de $R_{mín}$ é a seguinte:

$$R_{mín} = \frac{V^2}{127 \cdot (e_{máx} + f_{máx})} \qquad (8)$$

Entretanto, recomenda-se na medida do possível a utilização de raios maiores aos mínimos, cuja adoção é justificável em condições especiais.

Quando um veículo percorre uma curva horizontal o máximo valor do atrito transversal (ou lateral) é o valor do atrito desenvolvido entre o pneu e a superfície do pavimento na iminência do escorregamento.

É usual adotar-se para o máximo coeficiente de atrito lateral valores bem menores do que os obtidos na iminência do escorregamento, isto é, valores já corrigidos com um suficiente fator de segurança.

Os valores máximos admissíveis geralmente adotados em projetos rodoviários para o coeficiente f constam na tabela 1, abaixo:

V(km/h)	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
$f = f_T$	0,20	0,18	0,16	0,15	0,15	0,14	0,14	0,13	0,12	0,11

Tabela 1 – Valores dos coeficientes de atrito transversal f.

A AASHTO recomenda a equação abaixo, com V em km/h

$$f_T = 0,19 - \frac{V}{1600} \qquad (10)$$

Quanto a superelevação, a utilização de uma taxa máxima admissível mais elevada, originando valores mais elevados de superelevação para raios superiores ao mínimo, acarreta um aumento do conforto e segurança para o fluxo ininterrupto de veículos trafegando a velocidades próximas à velocidade diretriz. Por outro lado, taxas máximas de superelevação admissível com valores mais baixos são mais adequadas para situações com grande proporção de veículos operando a velocidades inferiores, como tráfego intenso de caminhões ou situações de congestionamento.

2- SUPERELEVAÇÃO

2-1 Introdução

Superelevação é a inclinação transversal de uma via. Essa inclinação é mais acentuada nas curvas. Sua utilização faz com que a força peso do veículo e também a força centrípeta, gerada quando o veículo está se deslocando, exerçam uma força de sentido para baixo, perpendicular á superfície da via, aumentando assim o atrito entre o pneu e pavimento.

Os valores recomendados pela (AASHTO, 1994) são determinados em função dos seguintes fatores:

- condição climática (chuva, gelo ou neve)
- condições topográficas do local
- tipo de área: rural ou urbana
- freqüência de tráfego lento no trecho considerado
- as características da textura do pavimento

Em estradas rurais – valor máximo de 12%
estradas urbanas – valor máximo de 8%
o DNIT- Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes recomenda o uso de $e_{máx}$ = 10%.

A Tabela 2 – resume os valores de $e_{máx}$. Cada projeto deverá ser especificadamente analisado, antes de ser escolhido o valor final a adotar.

$e_{máx}$ (%)	**Casos de Emprego**
12	Máximo absoluto em circunstâncias específicas.
10	Máximo normal. Adequado para fluxo ininterrupto. Adotar para rodovias Classe 0 e Casse 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.

Nos trechos em tangentes recomenda-se que a pista tenha um abaulamento de 2%, necessário para escoamento transversal da d'água.

Conforme mencionado anteriormente vimos que para cada velocidade V, o raio Rc, a superelevação e, e o coeficiente de atrita transversal f, constituem um conjunto de valores inter-relacionados, que pode ser expresso pela expressão abaixo:

$$Rc = \frac{V^2}{127\ (e + f)} \qquad (1)$$

Denominando que 1/Rc = C (curvatura), a equação acima fica:

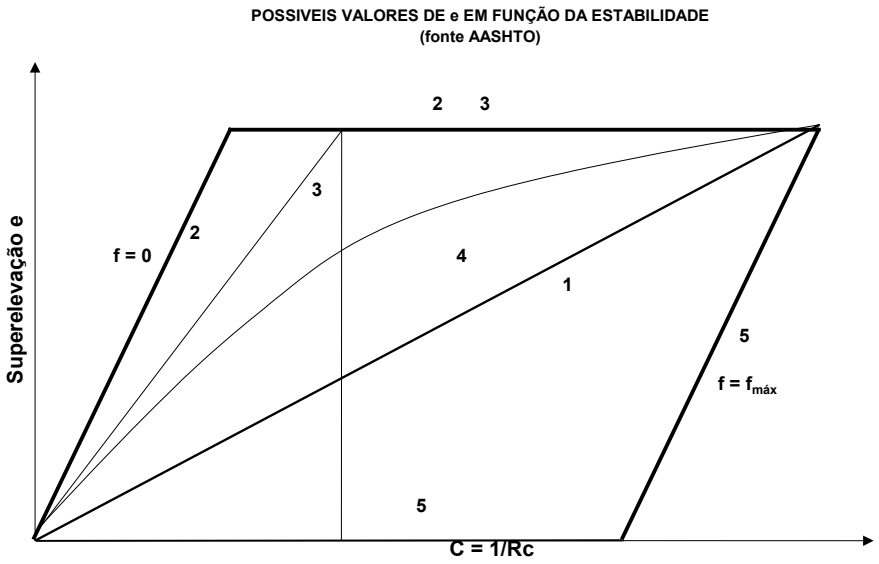
$$e = \frac{V^2}{127} . C - f \qquad (2$$

Para uma dada velocidade V e escolhido um Rc ou uma curvatura C, o valor para a superelevação e deverá estar compreendido entre os seguintes valores, onde $e_{máx} > e_1 > e_2 > 0$

$e_1 = \frac{V^2}{127} . C$ $\quad f = 0,$ o veículo realiza a curva exclusivamente com o efeito da superelevação.

$e_1 = \frac{V^2}{127} . C - f_{máx}$ $\quad f = f_{máx},$ o veículo realiza a curva com todo a contribuição do atrito lateral possível

Locando os valores da superelevação e em função do raio Rc ou da curvatura C em um gráfico, podemos observar que os valores de e que satisfazem a equação 3.2, se encontram num paralelogramo definido pelas linhas correspondentes aos valores e = 0, e = $e_{máx}$, f = 0 e f = $f_{máx}$. Qualquer valor de superelevação que esteja no interior do paralelogramo atende ass exigências mínimas de estabilidade dos veículos na curva.



No gráfico acima é possível verificar basicamente 5 métodos:

1 Método de La Torre, a escolha da superelevação é diretamente proporcional a curvatura C. Nesse método a variação da superelevação é linear com o inverso do Rc. Sua utilização implica em uma vasta gama de curvas deixará de utilizar a máxima superelevação possível;

2 Escolha de um valor tal que um veículo trafegando na velocidade de projeto tenha toda a força centrífuga compensada pela superelevação e (f = 0). Nesse método, para os veículos que trafegam com a velocidade operação, o coeficiente de atrito lateral torna-se negativo;

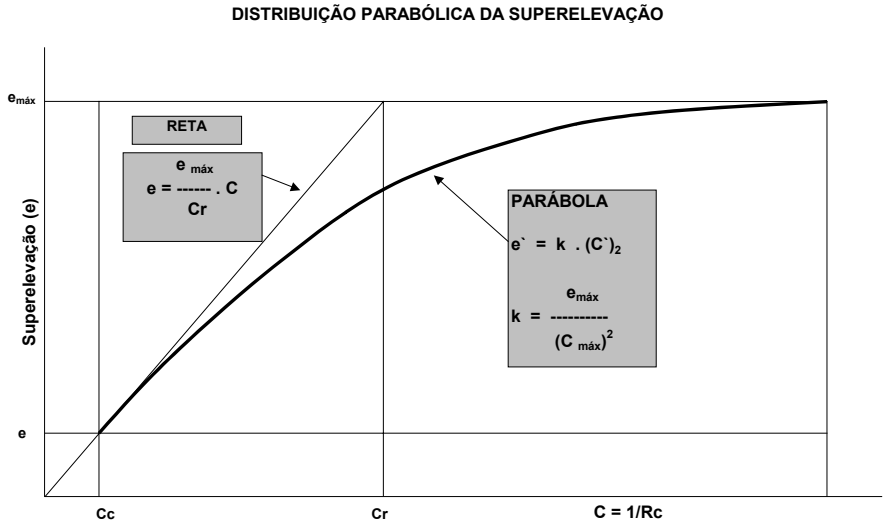
3 Método de Barnet, é o mesmo critério descrito no item 2 , com a velocidade de operação no lugar da velocidade diretriz. Esse método procura minimizar o efeito do método anterior;

4 Método da AASHTO, a escolha de um valor para a superelevação numa relação não linear entre os valores compreendidos entre os valores dos métodos 1 e 2. Nesse método ocorre uma variação curvilínea de e e de f, com o inverso do raio da curva, situado entre os métodos 1 e 2.

5 Nesse método o veículo é equilibrado com todo o atrito lateral possível ($f = f_{máx}$).

2-2 – Taxa de Superelevação para Raios Acima dos Mínimos

Conforme mostrado acima a AASHTO após vários estudos em diversas curvas, optou por recomendar o método parabólico, equacionando essa parábola temos:



$$e_{máx} - e = k\,(C_{máx} - C)^2$$

$$e_{máx} - e = e_{máx} / (C_{máx})^2 \cdot (C_{máx} - C)^2$$

$$e_{máx} - e / e_{máx} = ((C_{máx} - C) / C_{máx}))^2$$

$$1 - (e / e_{máx}) = (1 - C / C_{máx})^2 = (1 - R_{mín} / Rc)^2$$

$$\mathbf{e = e_{máx}.(2R_{mín}/ Rc - R_{mín}2/Rc^2)} \qquad (3)$$

A fórmula da parábola acima é adotada pelo DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes para o cálculo da taxa de superelevação para raios acima dos mínimos.

Para curvas com grandes raios, a superelevação é desnecessária. Adotando-se para esses casos a seção normal em tangente, os veículos trafegando na faixa de rolamento com superelevação negativa ficam sujeitos a atritos transversais inferiores aos valores máximos admissíveis. Também os esforços necessários no volante para manter o veículo na pista situam-se dentro de limites aceitáveis.

Um critério simples, associado à velocidade diretriz, para estabelecer os valores dos raios mínimos acima dos quais a superelevação pode ser dispensada encontra-se resumido na tabela abaixo. Foi

considerada em seu cálculo uma superelevação negativa de 2% para os veículos que percorrem a lado externo da curva, mas são adequados também para pistas com abaulamentos diferentes.

V (km/h)	30	40	50	60	70	80	90	>/=100
Rc (m)	450	800	1250	1800	2450	3200	4050	5000

Fonte DNIT

Exercício 1 – Em uma rodovia de Classe Especial, temos e max = 10% e V = 100 km/h. Se uma curva nesta rodovia tem raio de 1000 m, calcular a superelevação a ser adotada.

Exercício 2 – Traçar os gráficos de taxa de superelevação para raios acima do mínimo para as velocidade de 80km/h e 100km/h.