

SP 08/94

NT 177/94

## Recomendações Funcionais – I Transições entre curvas tangentes e circulares

Engº José Tadeu Braz

### 1. Introdução

Quando transitamos pela maioria das avenidas do município de SP percebemos que ao iniciarmos os movimentos de entrada em curvas (circulares) após trechos retos (tangentes) temos que executar mudanças bruscas de manobra e conseqüente redução de velocidade, resultando muitas vezes em escorregamento. Esse escorregamento é facilitado principalmente nos dias de chuva e no início destas, pois os primeiros pingos depositam gordura proveniente da precipitação, juntando-se aos resíduos de óleo dos veículos no pavimento; já que é nas curvas que ocorre o derramamento de óleo dos motores e dos tanques (diesel) dos caminhões e ônibus, formando com isso uma lâmina (película) que impede uma melhor aderência dos pneus com o piso.

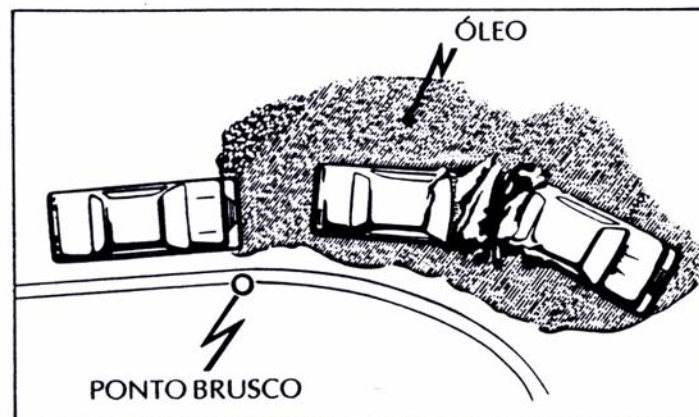
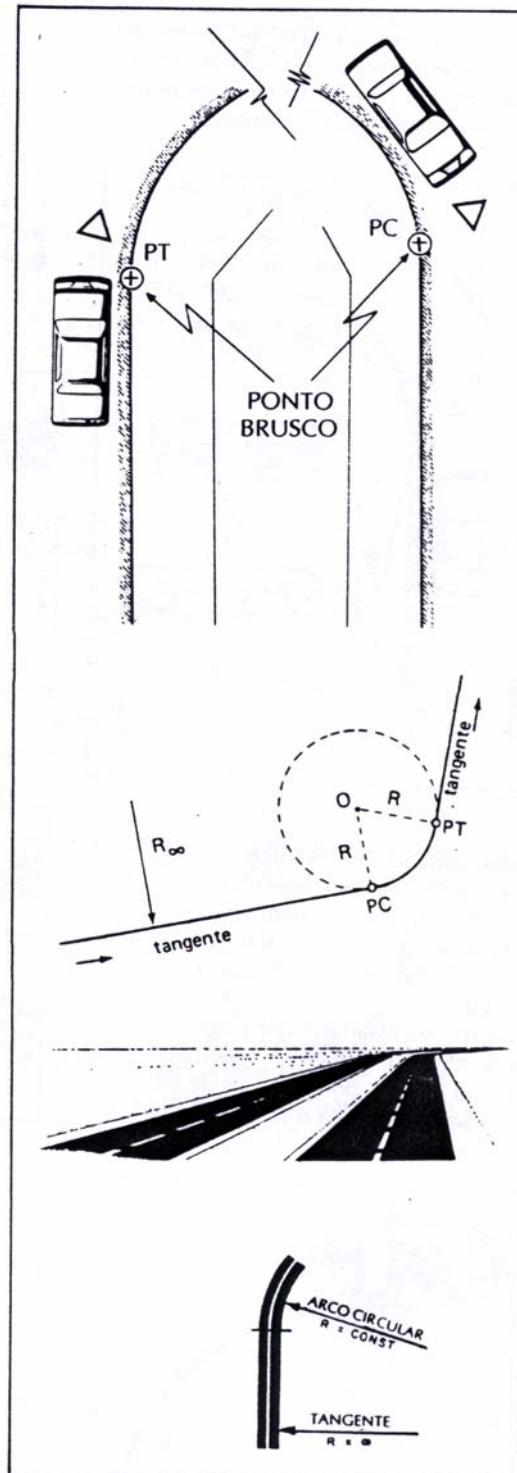


FIGURA 1

Isso se deve ao fato de as características técnicas geométricas impostas ao sistema viário não estarem adequadamente contempladas pelas curvas de transição entre as tangentes e circulares. Não estando presente, da mesma forma, na devolução das circulares para as tangentes como recomenda a boa técnica.

Devemos observar que a maioria dos casos de escorregamento deve-se ao estado de manutenção dos pneus; contudo, pode ocorrer a perda de aderência em trechos retos (tangentes) conhecida como fenômeno de aquaplanagem ou hidroplanagem, em muitas vezes devido a falhas na drenagem superficial da via. Evidentemente, a má conservação dos pneus só vem aumentar esta possibilidade

FIGURA 2



Este efeito brusco cria um potencial de conflito nas proximidades onde as curvas de transição deveriam estar presentes, com conseqüentes acidentes do tipo abalroamento lateral entre veículos.

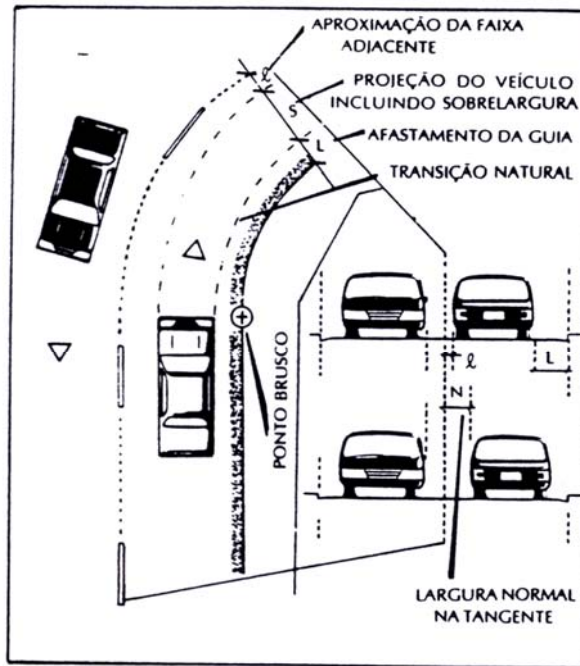


FIGURA 3

O quase abalroamento exemplificado na Figura 3 é devido aos veículos estarem executando suas próprias transições (transições naturais) dentro das respectivas faixas, que em sua maioria também não estão contempladas com a “sobrelargura” e “sobreelevação” ou “superelevação” necessárias, o que é agravado pela alta taxa de força centrífuga. A superlargura e a superelevação devem, portanto, ser de tal forma dimensionadas que impeça o veículo de invadir a faixa de tráfego adjacente.

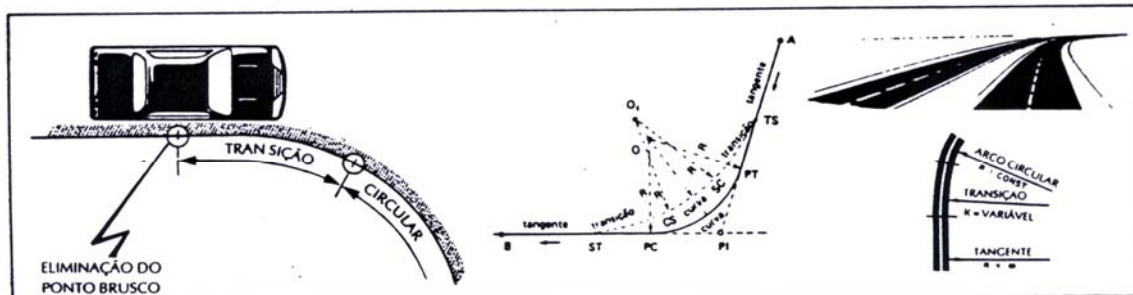


FIGURA 4

## 2. As características geométricas atuais devem ser revistas

No caso de concordância com a curva circular simples, há um conflito de obrigações nos PC e PT das curvas, quanto à questão da superelevação. Atualmente, esse impasse é resolvido distribuindo-se solidariamente, metade da superelevação na tangente e outra metade no trecho da circular.

- a) Aspecto de uma via sem curva de transição  
Pontos de curvas acentuadas
- b) Aspecto de uma via contemplada com transição  
Curvas de conformação suave

A) Aspecto de uma via sem curva de transição  
Pontos de curvas acentuadas

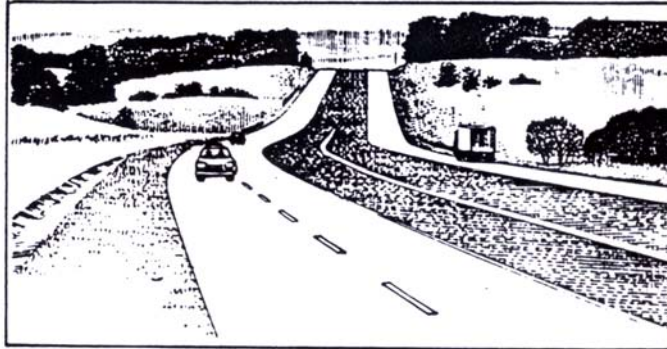


FIGURA 5

B) Aspecto de uma via contemplada com transição  
Curvas com conformação suave

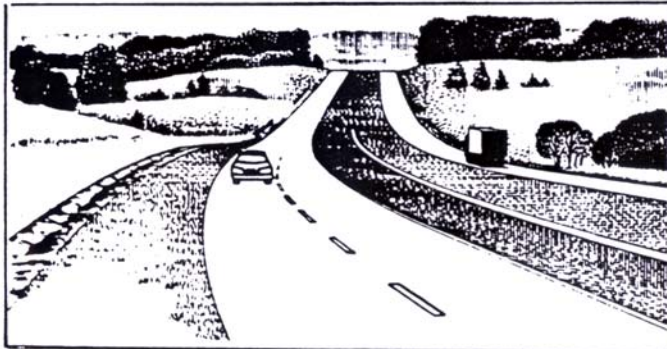


FIGURA 6

### 3. Lições de Física

Sabe-se que a aderência do pneu à superfície da pista não obedece à lei dos corpos rígidos, mas é função do escorregamento ( $\lambda$ ) na área de contato entre ambos. A força de frenagem também varia de acordo com o ângulo da roda, velocidade do veículo, carga na roda, temperatura, condições da pista e pneus (Figura 7)



FIGURA 7

A observação científica do fenômeno do escorregamento revela que o coeficiente de aderência é máximo na faixa de 20% de escorregamento, tanto na frenagem como na aceleração. Acima desse [índice, as rodas atingem uma região de instabilidade, tendendo ao bloqueio (frenagem) ou à “patinação” (aceleração).

Dentro de uma idêntica faixa de escorregamento, o coeficiente de aderência transversal ( $\mu_t$ ), responsável pela estabilidade geral do veículo, diminui consideravelmente quando comparado ao coeficiente longitudinal ( $\mu_a$ ), que comanda a velocidade do veículo (Figura 8).

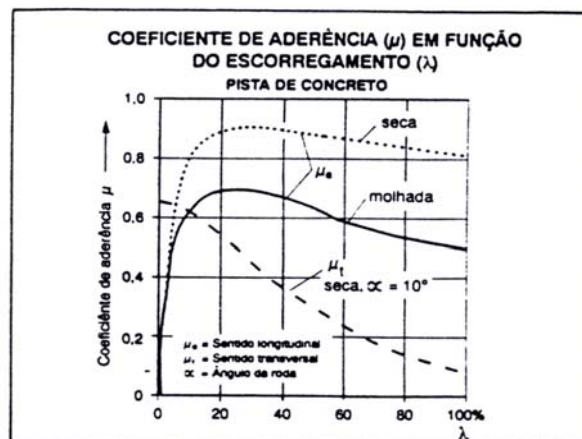


FIGURA 8

Na frenagem, o índice de escorregamento é proporcional à velocidade do veículo, menos a velocidade da roda, dividida pela velocidade do veículo:

$$\lambda = \frac{V_v - V_r}{V_v} \times 100\%$$

Já na aceleração, toma-se como referência a velocidade da roda, que, neste caso, é maior do que a velocidade do veículo:

$$\lambda = \frac{V_r - V_v}{V_v} \times 100\%$$

#### 4. Raio mínimo horizontal sem curva de transição

Traçados modernos, em se tratando de concepção, não descartam a utilização de transições em espiral para as passagens de traçado tangente a traçado circular. Os limites para a utilização destes elementos não devem se restringir à análise das normas para aplicação, mas também das condições de controle topográfico, de área disponível e manutenção da seção transversal no caso de um traçado de duplicação.

Mesmo para condições mais favoráveis de raios em curvas circulares deve também ser analisada a inserção de transições no alinhamento horizontal.

Quanto à aplicação de curvas de transição, as normas recomendam que nos raios abaixo de 600 metros e superelevação acima de 3%, estas devem ser inscritas; acima de 600 metros podem ser utilizadas as circulares como concordantes. Convém lembrar que, independente dos raios de curvas, a superelevação nunca deve ultrapassar, em hipótese alguma, a 12%, e sempre que possível manter entre 2% e 6%.

#### 5. Comprimento mínimo de transição

A necessidade da utilização de curvas de transição é uma função do raio do alinhamento horizontal, da velocidade de projeto e da superelevação. A curva de transição adotada para nossos cálculos será do tipo espiral, cuja praticidade pode ser vista sob diversos aspectos (entre eles, projeto e implantação) superando as demais apresentadas no item 7 – Tipos e curvas de transições.

O comprimento necessário da curva de transição é determinado em função de velocidade e do grau de curvatura (sistema inglês, com arcos de 100) ou raio do alinhamento horizontal junto com um valor escolhido para a variação de aceleração radial.

Os gráficos 1 e 2 indicam valores desejáveis e mínimos para os comprimentos das curvas de transição nas condições com o raio mínimo de curvatura horizontal

A seguir um exemplo para transformar o raio em metros para o grau de curvatura em sistema inglês.

$$D = \frac{5729,6}{R. 3,2808}$$

**D** = Grau de curvatura sistema inglês  
**R** = Raio de curvatura em metros

3,2808 e 5729,6 = fatores de conversão para o sistema inglês.

##### 5.1. Exemplo:

Dados do traçado:

Velocidade Diretriz = 90 km/h

##### 5.2. Marcha de cálculo

##### 5.2.1. Cálculo do raio mínimo de curvatura horizontal

$$R_{\min} = \frac{V^2}{127 \cdot (e + f)} \quad \text{ou} \quad R_{\min} = \frac{V^2}{127 \cdot (\text{tg}\infty + f)}$$

onde:

$R_{\min}$  = raio do bordo interno da curva em metros

$V$  = velocidade diretriz em km/h

$tg\infty = e$  = superelevação fração decimal

$s$  = fator de atrito lateral do pavimento

### 5.2.2. Cálculo da Superelevação

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

$$tg\infty = \frac{90^2}{127 \cdot 298} - 0,134$$

$$tg\infty = 0,08$$

### 5.2.3 Cálculo do fator de atrito

$$f = 0,19 - (V \cdot 0,0006214) \text{ ou } f = 0,19 - \frac{V}{1600} \quad (*)$$

$$f = 0,19 - (90 \cdot 0,0006214) \quad f = 0,134$$

### 5.2.4 Cálculo do raio mínimo

O cálculo do raio mínimo para superelevação máxima de 8% a ser adotado é:

$$R_{\min} = \frac{90^2}{127 (0,08 + 0,134)} = 298 \text{ m}$$

### 5.2.5. Grau de curvatura

$$D = \frac{5729,6}{298 \times 3,2808}$$

$$D = 5,90^\circ \rightarrow \text{ver os gráficos 1 e 2}$$

(\*) fórmula do professor Afonso de la Torre

Portanto, comprimentos mínimos desejáveis ou admitidos serão os seguintes:

- Recomendável (Gráfico 1)  $I_c$  - 170,00 metros
- Mínimo (Gráfico 2)  $I_c$  - 85,00 metros

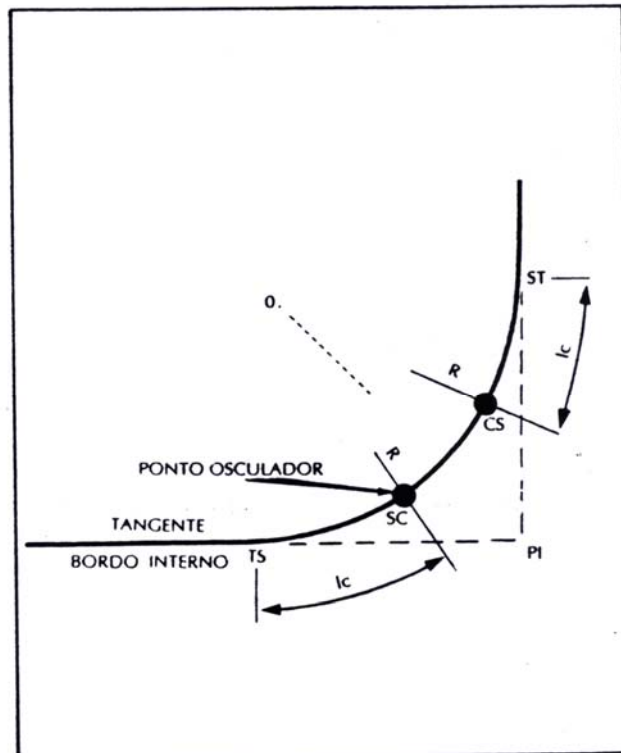
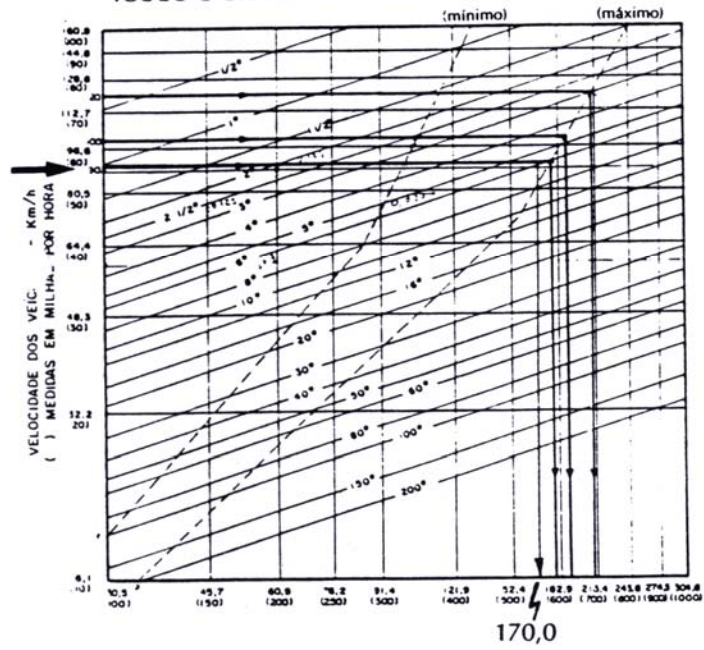


FIGURA 9

GRÁFICO 1

COMPRIMENTO DESEJADO DA CURVA ESPIRAL  
ADMITIDA CONFORME A VELOCIDADE DO VEÍCULO  
E GRAU DA CURVA CIRCULAR

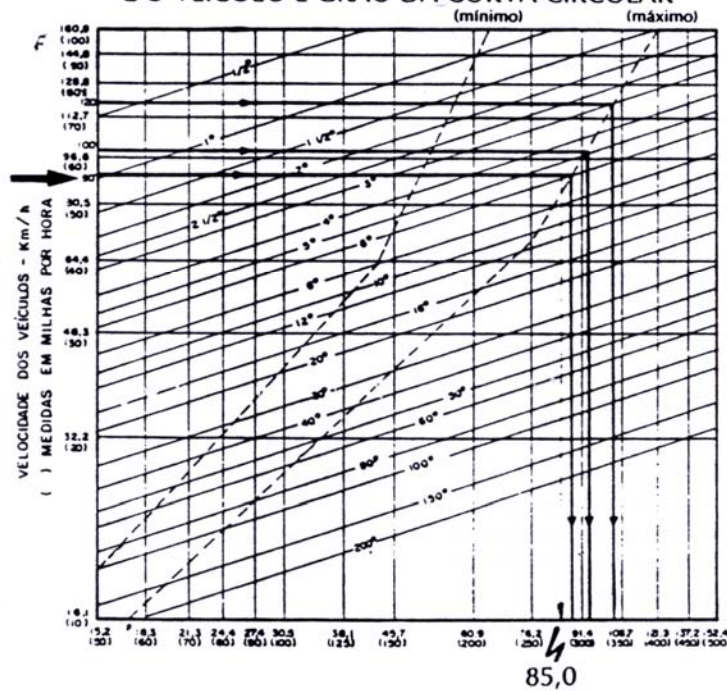


170,0



GRÁFICO 2

COMPRIMENTOS MÍNIMOS DA CURVA ESPIRAL ADMITIDA, CONFORME A VELOCIDADE DO VEÍCULO E GRAU DA CURVA CIRCULAR



Normalmente, os comprimentos de gradação (Run off) para curvas de transição são adotados com valores menores que os da diretriz anteriormente recomendada.

6. Cada caso, Um caso

A opção de projeto não deve restringir-se apenas à aplicação de um determinado “Ic”, conforme indicado em alguma referência, e sim analisar as condições de restrição, ensaiando o melhor traçado possível. Para sistemas urbanos com geometria travada (restrita), cuidados devem ser tomados, pois a implantação de curva de transição associada à superelevação terá como controle as soleiras das edificações. Outro aspecto importante é o avanço desta correção na curva externa, onde geralmente esta avança diminuindo a área de passeio e conseqüentemente necessitando de desapropriações. Portanto, cada caso é um caso, devendo ser estudado conforme a tipologia local.

7. Tipos de curvas de transição

São utilizados em alguns países:

- a) Espiral de Van Leber, utilizada em nosso trabalho e conhecida também como Espiral de Cornu, Clotóide e Radióide de Arcos (EUA – Brasil).

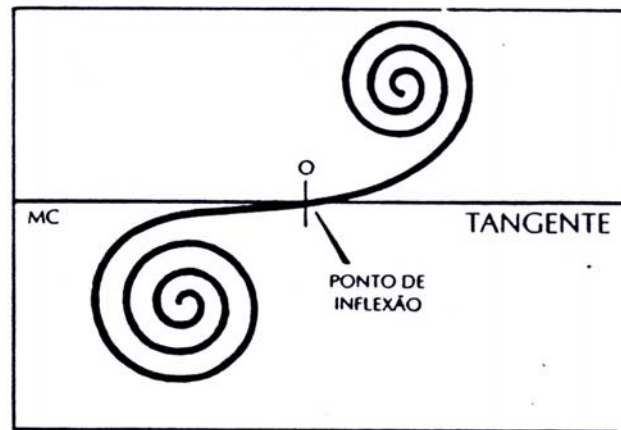


FIGURA 10

- b) Radióide às Cordas ou Lemniscata de Bernouille (Inglaterra – Itália).
- c) Radióide às Abcissas ou Curva Elástica
- d) Parábola Cúbica
- e) Falsas Espirais de Searles e Lee Parkins (EUA), já descartadas.
- f) Transições a Raio Duplo ou Aproximadamente Duplo (Europa).

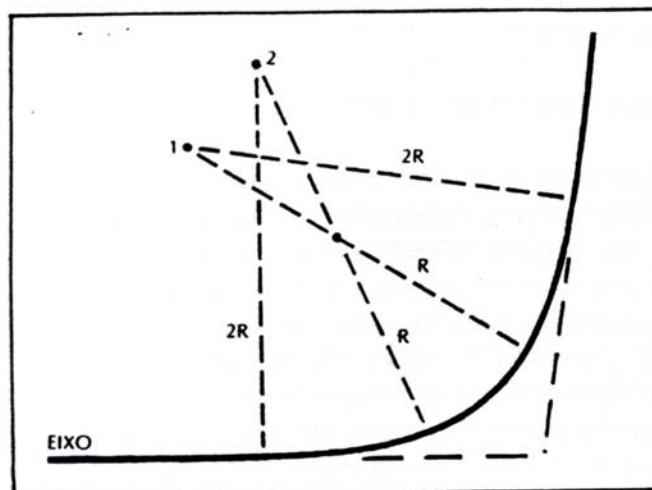


FIGURA 11

- g) Senóide (Japão) – conhecida como a mais moderna em experimento.
- h) Correlatas de Caquot, Klein e Bloss (Europa)

As curvas dos itens a, b, c e d são conhecidas como Curvas Clássicas. No caso de projetos para a situação brasileira é recomendada a aplicação da Curva Espiral ou da Lemniscata, por serem as mais perfeitas e quase coincidentes.

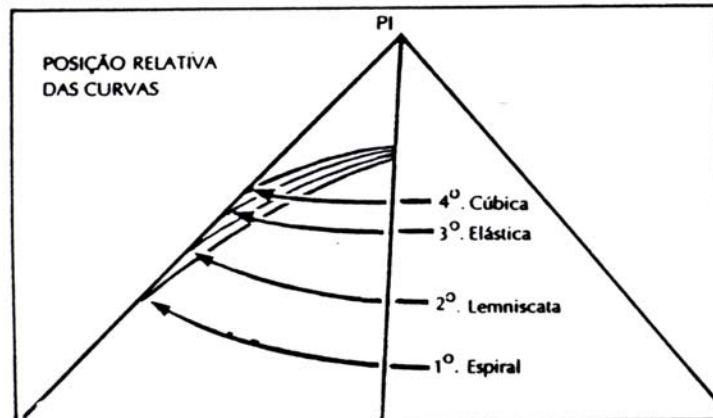


FIGURA 12

## 8. Outras fórmulas recomendadas para curvas espirais

### 8.1. Comprimento das curvas espirais

#### 8.1.1. Mínimo

$$Ic = 0,036 \cdot \frac{V^3}{R} \text{ (fórmula de Barnett) }^*$$

(\*) Engº Joseph Barnett – *Public Road Administration* (USA) <sup>4</sup>

#### 8.1.2 Normal de Transição

$$Ic = 6 \cdot \sqrt{R}$$

A fórmula normal de Transição que pode ser utilizada para qualquer velocidade diretriz desde que não resulte em um valor inferior ao mínimo.

Estas fórmulas são utilizadas pelo DNER e são as que mais se aproximam do gráfico de Pryor quanto a raios mínimos, já que os arredondamentos aconselháveis não devem ultrapassar + 10,00 metros.

## 9. Conclusão

Portanto, para garantir a passagem de uma curva de raio infinito (tangente) para uma curva de raio finito (circular) e garantir a inserção de outros elementos de segurança, é necessário estabelecermos curvas de transição em projetos novos e de readequações propiciando ainda uma melhor concordância com as trajetórias dos veículos. Outras facilidades com a prática da inserção de curvas de transição vêm resolver algumas deficiências dentro da geometria onde poderíamos citar vantagens:

- 1) Facilita a distribuição da superelevação de uma forma coerente
- 2) Facilita o giro da superfície do pavimento (superelevação para correção do centro geométrico dos veículos de drenagem)
- 3) Facilita ainda a transição da largura normal para a superlargura

Desta forma, não estaremos ignorando alguns fatores que contribuem, na sua falta, por diversos acidentes.

#### 10. Recomendação ambiental

O fator importante que deve ser considerado na melhoria destes locais é que com a correção estaremos reduzindo a emissão de Óxidos de nitrogênio e perda de energia cinética desnecessária. As emissões de NOx, como se sabe, se dá na retomada de velocidade através de aceleração moderada, fazendo com que o NOx se forme devido às altas temperaturas e altas relações ar-combustível.<sup>10</sup>

#### Referências bibliográficas

1. AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY OFFICIALS  
*A policy on design of urban highway and arterial streets*  
Washington: AASHO, 1973. 740p.
2. BRASIL. Departamento de Trânsito  
*Manual de Segurança de Trânsito*  
Brasília: DENATRAN, 1984. 2V (Coleção Serviços de Engenharia, 9)
3. BRASIL. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem.  
*Normas para o projeto de estradas de rodagem.*  
Rio de Janeiro: DNER, 1965.
4. CANADA. Roads and Transportation Association.  
*Uniform traffic control devices for Canada: metric edition 3 ed.*  
Ottawa: RTAC, 1976.
5. CARVALHO, M.P.  
*Curso de estradas: estudos projetos e locações de ferrovias e rodovias*  
Rio de Janeiro: Científica, 1966
6. INSTITUTO DE PESQUISAS RODOVIÁRIAS  
*Manual de projetos de intersecção.*  
Rio de Janeiro: IPR, 1970. 114p. (Publicação 503)
7. LEHFELD, Gilberto Monteiro (tradução)  
*Eficiência do sulcamento do pavimento na redução de acidentes*  
São Paulo: CET, 1993. 4p (Notas Técnicas 170)
8. MERCEDES BENZ S.A.  
*Folheto ABS / ASR: sistemas antibloqueio de rodas e de regulação deslizante*
9. PRYOR, William T.  
*Circular curve and unit length spiral tables. 1956*
10. SEMINÁRIO SOBRE EFEITOS DE ALDEÍDOS ATMOSFÉRICOS NA SAÚDE E NO MEIO AMBIENTE, 1989

Trabalho apresentado por G. M. Branco e A. Szwarc.

11. SENCO, Wlastermiller de.  
*Estradas de Rodagem: projeto DPL.*  
São Paulo: Escola Politécnica, Grêmio Politécnico (19..)
12. SEQUEIRA, Márcio Peixoto  
*Tráfego e meio ambiente: concepção preliminar.*  
Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 1980. 366 p.

-----  
Engº José Tadeu Braz

Colaboração:  
Carlos Alberto de Oliveira  
Marcelo Balthazar  
Marília Bruni Mubarak  
Leandro Bruhns de Faro  
(GPC / SPR)