

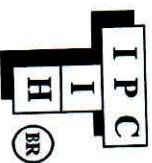
# ESTRADAS DE RODAGEM PROJETO GEOMÉTRICO

*Glauca Pontes Zilho*  
Engenheiro Civil

**GP ENGENHARIA**

Construção, Pavimentação e Conservação de Estradas

**bidim**<sup>®</sup>



INSTITUTO PANAMERICANO DE CARRETERAS BRASIL

PAN AMERICAN INSTITUTE OF HIGHWAYS - PIH

e-mail: [ipcbrasil@lexxa.com.br](mailto:ipcbrasil@lexxa.com.br) - Home Page: [www.ipc.org.br](http://www.ipc.org.br)

**Copyright © 1998, Glauco Pontes Filho**

*Proibida a reprodução, mesmo parcial, e por qualquer processo,  
sem autorização expressa do autor.*

Editoração Eletrônica: *Glauco Pontes Filho*

Fotolitos: *Diagrama Pré-Impressão*

*Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)*

Pontes Filho, Glauco.

Estradas de rodagem : projeto geométrico / Glauco

Pontes Filho. – São Carlos : G. Pontes Filho, 1998.

432 p.:il.

1. Estradas rurais 2. Rodovias – Projeto I. Título.

CDD-625.725

*Índices para Catálogo Sistemático*

1. Projetos geométricos : Rodovias 625.725

2. Rodovias : Projetos : Engenharia 625.725

3. Rodovias rurais : Projetos : Engenharia 625.725



## PREFÁCIO

A cada dia e hora o transporte fica mais importante para a economia e o bem estar social. Primeiro, porque é a capacidade que o homem desenvolveu ao aprender a trocar os seus excedentes de produção, tomando-se o principal recurso para ampliar a capacidade de sobrevivência, a longevidade, a felicidade e o conforto dos seres humanos. Segundo, porque os avanços da tecnologia contribuem para fazer de meios e equipamentos para transporte um conjunto de elementos que ampliam o ciclo da economia, mesmo consumindo recursos humanos e naturais ao produzir a viagem de bens ou pessoas.

Por outro lado, embora a maioria dos cursos de graduação em engenharia civil inclua fundamentos sobre projetos de vias para transporte, boa parcela dos engenheiros formados carecem de prática e métodos para colocar em ação a teoria e os processos de estimativa de características de rodovias e assemelhados de maneira eficaz e eficiente.

O pior ocorre quando livros, normas e manuais preocupam-se apenas em mostrar o subjacente e a exceção de teorias e fundamentos que podem ser aplicados ao trabalho de projeto e manutenção de vias.

A presente obra cobre exatamente uma parcela da necessidade de engenheiros e estudantes em ter acesso a resumos de teorias e especificações sobre procedimentos para tratamento de características de rodovias e outras vias para estudos, projetos e verificações. É dirigida ao prático e ao pesquisador iniciante, e inclui de maneira sintética e pronta para uso os métodos indispensáveis para o processamento do conhecimento sobre os tópicos que se dispõe a abrange.

Este livro é destinado ao sucesso porque seu conteúdo abreviará os caminhos para o aprendizado de engenheiros, estudantes e pesquisadores.

*José Bernardez Zeller*

Professor Titular,  
Diretor do Centro de Processamento de Dados,  
Chefe do Departamento de Transportes e  
Presidente da Comissão de Pesquisa na  
Escola de Engenharia de São Carlos da  
Universidade de São Paulo

## APRESENTAÇÃO E AGRADECIMENTOS

Escrever um livro é uma tarefa laboriosa, porém, ter a experiência de vários anos materializada desta maneira é um sonho de qualquer professor que se dedica ao ensino e à pesquisa.

No Brasil, a maioria dos professores universitários das disciplinas de projeto geométrico de estradas adotam apostilas nos seus cursos devido à carência de livros didáticos atualizados sobre o tema. Esperamos, com a presente obra, preencher esta lacuna. O livro é direcionado aos estudantes de engenharia civil (cursos de graduação), estudantes de pós-graduação e engenheiros civis engajados no projeto e construção de estradas.

Este livro contém o programa básico das disciplinas relacionadas ao projeto geométrico de estradas de rodagem, lecionadas nos cursos de engenharia civil das universidades brasileiras. O objetivo principal do livro é transmitir, em linguagem didática e acessível, os conceitos fundamentais para projeto geométrico de estradas de rodagem, de acordo com as mais recentes normas rodoviárias do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER). Tabelas, gráficos, ábacos e programas na calculadora HP-48 G/GX são apresentados, assim como exercícios resolvidos e propostos, que possibilitarão melhor fixação de conhecimentos e conceitos.

Durante o longo caminho trilhado entre a idéia inicial e a publicação do livro, contamos com a colaboração dos engenheiros Roberto Toshimitsu Aramaki (BIDIM - BBA), Cássio Alberto Teoro do Carmo (VERAM Tecnologia), John Kennedy Guedes Rodrigues e Gilmar Trindade de Araújo (UFPPB), Alexandre Henrique Borges Assi (OUACLIL Construções e Terraplenagem Ltda), Rubens Brazetti (DNER), Márcio Augusto de Sousa Nogueira, Carlos Henrique Barreiro, Fernando Luiz Mendes Mariano, Adauto Medeiros Filho e Romildo Teles Pinto da Frota, aos quais deixo aqui meus sinceros agradecimentos.

Agradecemos também aos professores Carlos Reynaldo Toledo Pimenta e Marcio Pires de Oliveira, da Escola de Engenharia de São Carlos / USP, pelos exercícios que enriqueceram esta obra.

Um agradecimento especial ao meu grande incentivador, mestre e amigo José Bernardes Felex, professor titular da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, ao qual exteriorizo aqui a minha eterna gratidão.

Finalmente, àqueles que desejarem criticar e sugerir alterações para inclusão em futuras edições, apresento meus agradecimentos antecipados, solicitando que enviem suas observações pelo e-mail [gpontes@usa.net](mailto:gpontes@usa.net).

São Carlos, novembro de 1998.

*Glauca Pontes Zilka*

*“A terra ferida vingá-se produzindo flores”*

*Tagore*

# SUMÁRIO

|  |           |
|--|-----------|
| <b>CAPÍTULO 1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS</b>               | <b>01</b> |
| Introdução   | 01        |
| Estudos para construção de uma estrada                 | 02        |
| Reconhecimento   | 03        |
| Exploração   | 06        |
| Projeto  | 08        |
| Fatores que influem na escolha do traçado              | 12        |
| Desenvolvimento de traçados                            | 14        |
| Classificação das rodovias                             | 20        |
| 1) Quanto à posição geográfica                         | 20        |
| 2) Quanto à função                                     | 23        |
| 3) Quanto à jurisdição                                 | 24        |
| 4) Quanto às condições técnicas                        | 25        |
| Níveis de serviço                                      | 27        |
| <br>   |           |
| <b>CAPÍTULO 2 – ELEMENTOS GEOMÉTRICOS DAS ESTRADAS</b> | <b>29</b> |
| Introdução   | 29        |
| Azimutes e ângulos de deflexão                         | 31        |
| Curvas de concordância horizontal                      | 36        |
| Greides  | 40        |
| Seções transversais                                    | 44        |
| Exercícios   | 48        |

|  |           |  |            |
|--|-----------|--|------------|
| <b>CAPÍTULO 3 – CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS PARA PROJETO</b>            | <b>51</b> | <b>CAPÍTULO 5 – CURVAS HORIZONTAIS DE TRANSIÇÃO</b>          | <b>127</b> |
| Introdução   | 51        | Introdução   | 127        |
| Velocidade de projeto  | 52        | Tipos usuais de curvas de transição                          | 128        |
| Velocidade de operação   | 53        | Curva horizontal com transição (simétrica)                   | 131        |
| Veículos de projeto  | 54        | Cálculo dos elementos da espiral (método do raio conservado) | 132        |
| Distâncias de visibilidade   | 59        | Comprimento mínimo de transição (critério dinâmico)          | 141        |
| Distância de visibilidade de parada                                  | 60        | Comprimento máximo de transição                              | 144        |
| Distância de visibilidade de ultrapassagem                           | 67        | Locação de curvas de transição                               | 151        |
| <b>CAPÍTULO 4 – CURVAS HORIZONTAIS CIRCULARES</b>                    | <b>71</b> | Curva circular com transições assimétricas                   | 158        |
| Introdução   | 71        | Curvas compostas com transição                               | 160        |
| Geometria da curva circular  | 72        | Exercícios   | 164        |
| Locação de curvas circulares por deflexão                            | 82        | <b>CAPÍTULO 6 – SUPERELEVÇÃO</b>                             | <b>171</b> |
| 1) Deflexões sucessivas  | 83        | Introdução   | 171        |
| 2) Deflexões acumuladas  | 84        | Taxas de superelevação para raios acima dos mínimos          | 176        |
| Locação de curvas circulares por offsets                             | 87        | Distribuição da superelevação                                | 182        |
| Raio mínimo de curvatura horizontal                                  | 90        | Diagramas de superelevação                                   | 190        |
| Visibilidade nas curvas horizontais                                  | 96        | 1) Giro em torno do eixo                                     | 191        |
| Curvas circulares compostas  | 102       | 2) Giro em torno da borda interna                            | 191        |
| Curva composta com 2 centros   | 102       | 3) Giro em torno da borda externa                            | 194        |
| Curva composta com 3 centros   | 108       | Exercícios   | 194        |
| Curva composta com 3 centros (acesso-tipo DERSA/SP)                  | 112       | <b>CAPÍTULO 7 – SUPERLARGURA</b>                             | <b>195</b> |
| 1) Cálculo dos ângulos centrais $\Delta_1$ , $\Delta_2$ e $\Delta_3$ | 114       | Introdução   | 195        |
| 2) Cálculo da tangente $T$   | 114       | Cálculo da superlargura                                      | 196        |
| 3) Cálculo da corda auxiliar $d$                                     | 115       | Distribuição da superlargura (pistas de 2 faixas)            | 203        |
| 4) Cálculo das coord. $X$ e $Y$ de $PT_1$ , em relação ao $PC_1$     | 116       |  |            |
| Exercícios   | 117       |  |            |

|                                     |     |
|-------------------------------------|-----|
| 1) Alargamento simétrico da pista   | 203 |
| 2) Alargamento assimétrico da pista | 204 |
| Exercícios                          | 207 |

**CAPÍTULO 8 – CURVAS VERTICAIS**

|   |     |
|---|-----|
| Introdução                                      | 209 |
| Tipos de curvas verticais                       | 214 |
| Cálculo das cotas e flechas da parábola simples | 215 |
| Cálculo do ponto de ordenada máxima ou mínima   | 218 |
| Cotas e estacas do PCV e PTV                    | 218 |
| Nota de serviço de terraplenagem                | 219 |
| Comprimento mínimo de curvas verticais          | 220 |
| Comprimento mínimo de curvas convexas           | 221 |
| Comprimento mínimo de curvas côncavas           | 227 |
| Exercícios                                      | 242 |

**CAPÍTULO 9 – NOÇÕES DE TERRAPLENAGEM**

|   |     |
|---|-----|
| Introdução                                | 255 |
| Cálculo de volumes                        | 256 |
| Cálculo das áreas das seções transversais | 258 |
| 1) Seções transversais em terreno plano   | 258 |
| 2) Seção mista                            | 259 |
| 3) Método analítico                       | 259 |
| 4) Planímetros                            | 260 |
| Diagrama de massas                        | 261 |
| Fator de homogeneização de volumes        | 265 |
| Propriedades do diagrama de massas        | 266 |

|                       |     |
|-----------------------|-----|
| Momento de transporte | 270 |
| Exercícios            | 274 |

**CAPÍTULO 10 – ALINHAMENTOS HORIZONTAL E VERTICAL**

|  |     |
|--|-----|
| Alinhamento horizontal                             | 283 |
| Alinhamento vertical                               | 288 |
| Faixas auxiliares para veículos lentos em rampas   | 290 |
| Comprimento crítico de rampa                       | 290 |
| Determinação dos pontos de início e fim das rampas | 296 |
| a) Ponto de início da rampa                        | 296 |
| b) Ponto final da rampa                            | 298 |
| Determinação do ponto de início da faixa adicional | 299 |
| Determinação do ponto final da faixa adicional     | 301 |
| Coordenação dos alinhamentos horizontal e vertical | 309 |

**CAPÍTULO 11 – INTERSEÇÕES RODOVIÁRIAS**

|  |     |
|--|-----|
| Introdução                               | 317 |
| Interseções em nível                     | 318 |
| Interseções com 3 ramos                  | 319 |
| Interseções com 4 ramos                  | 319 |
| Interseções de ramos múltiplos           | 320 |
| Rotatórias                               | 320 |
| Tipos de manobras e conflitos            | 321 |
| Princípios de canalização de tráfego     | 324 |
| Faixas de mudança de velocidade          | 327 |
| Interseções em desnível ou interconexões | 333 |
| Trevo completo                           | 335 |

|               |     |
|---------------|-----|
| “T” e “Y”     | 335 |
| Diamante      | 336 |
| Trevo Parcial | 337 |
| Direcionais   | 337 |

Características das interconexões

|  |     |
|--|-----|
| Diamante simples                                       | 338 |
| Diamante aberto  | 339 |
| Diamante aberto com um sentido de circulação           | 340 |
| Trevo completo   | 341 |
| Trevo completo com vias C-D (coletoras-distribuidoras) | 342 |
| Trevo parcial (Parclo – <i>Partial Cloverleaf</i> )    | 343 |
| Trevo Parcial (Parclo – 4 quadrantes)                  | 344 |
| Trombeta   | 345 |
| Interconexão giratória                                 | 346 |
| Interconexões direcionais                              | 347 |
| Escolha do tipo de interconexão                        | 348 |

**RESPOSTAS DOS EXERCÍCIOS**

**ANEXO I – Resumo de Fórmulas e Equações**

**349**

**ANEXO II – Listagens de Programas – Calculadora HP-48 G/GX**

**383**

**ANEXO III – Resumo dos Critérios Básicos para Projeto Geométrico de Rodovias Rurais, Agrupados por Classe de Projeto**

**421**

**BIBLIOGRAFIA**

**427**

## LISTA DE FIGURAS

|      |   |    |
|------|---|----|
| 1.1  | Diretriz geral de uma estrada                         | 04 |
| 1.2  | Planta e perfil longitudinal de uma estrada           | 11 |
| 1.3  | Seção transversal de uma estrada                      | 13 |
| 1.4  | Desenvolvimento de traçado em ziguezague              | 14 |
| 1.5  | Desenvolvimento de traçado em ziguezague              | 15 |
| 1.6  | Desenvolvimento de traçado acompanhando o talvegue    | 15 |
| 1.7  | Desenvolvimento de traçado acomp. as curvas de nível. | 16 |
| 1.8  | Diretriz cruzando espigão pela garganta.              | 16 |
| 1.9  | Transposição de gargantas.                            | 17 |
| 1.10 | Traçado ao longo de uma cadeia de montanhas.          | 18 |
| 1.11 | Estudo de traçados.                                   | 18 |
| 1.12 | Estudo de traçados.                                   | 19 |
| 1.13 | Desenvolvimento de traçado em região plana.           | 19 |
| 1.14 | Exemplos de rodovias do Estado de São Paulo.          | 22 |
| 1.15 | Exemplos de rodovias federais.                        | 23 |
| 2.1  | Elementos geométricos de uma estrada.                 | 30 |
| 2.2  | Elementos geométricos axiais.                         | 31 |
| 2.3  | Azimute e comprimento de um alinhamento.              | 32 |
| 2.4  | Cálculo de coordenadas retangulares.                  | 33 |
| 2.5  | Dedução do azimute de um alinhamento.                 | 35 |
| 2.6  | Tipos de curvas horizontais.                          | 37 |



|      |  |     |      |  |     |
|------|--|-----|------|--|-----|
| 2.7  | Tipos de curvas horizontais.                                 | 38  |      |  |     |
| 2.8a | Elementos de uma curva composta com dois centros.            | 38  |      |  |     |
| 2.8b | Elementos de uma curva composta com três centros.            | 39  |      |  |     |
| 2.9a | Perfil Longitudinal.   | 41  |      |  |     |
| 2.9b | Perfil Longitudinal.   | 43  |      |  |     |
| 2.10 | Tipos de greides.  | 43  |      |  |     |
| 2.11 | Tipos de curvas verticais (greides curvos).                  | 44  |      |  |     |
| 2.12 | Seção em corte.  | 45  |      |  |     |
| 2.13 | Seção em aterro.   | 45  |      |  |     |
| 2.14 | Seção mista.   | 45  |      |  |     |
| 3.1a | Dimensões do veículo de projeto VP ( <i>cm</i> ).            | 57  |      |  |     |
| 3.1b | Dimensões do veículo de projeto CO ( <i>cm</i> ).            | 57  |      |  |     |
| 3.1c | Dimensões do veículo de projeto O ( <i>cm</i> ).             | 58  |      |  |     |
| 3.1d | Dimensões do veículo de projeto SR ( <i>cm</i> ).            | 58  |      |  |     |
| 3.2  | Distância de visibilidade de parada.                         | 61  |      |  |     |
| 3.3  | Relação entre o coef. de atrito longitudinal e a velocidade. | 64  |      |  |     |
| 3.4  | Esquema de ultrapassagem.                                    | 68  |      |  |     |
| 4.1  | Curva horizontal circular simples.                           | 73  |      |  |     |
| 4.2a | Localção de curvas circulares por ângulos de deflexão.       | 82  |      |  |     |
| 4.2b | Localção de curvas circulares por <i>offsets</i> .           | 87  |      |  |     |
| 4.3  | Forças atuantes num veículo em curva.                        | 90  |      |  |     |
| 4.4  | Curva horizontal em aterro.                                  | 96  |      |  |     |
| 4.5  | Curva horizontal em corte.                                   | 97  |      |  |     |
| 4.6  | Curva composta com 2 centros.                                | 102 |      |  |     |
| 4.7  | Curva composta com 2 centros (inverso da figura 4.6).        | 103 |      |  |     |
| 4.8a | Curva composta com 3 centros.                                | 109 |      |  |     |
|      |  |     | 4.8b | Curva composta com 3 centros (inverso da figura 4.8a).                       | 110 |
|      |  |     | 4.9  | Acesso-tipo DERSA/SP.  | 112 |
|      |  |     | 5.1a | Curvas de raio variável.   | 129 |
|      |  |     | 5.1b | Tipos de clóides.  | 130 |
|      |  |     | 5.2  | Curva horizontal com espirais de transição simétricas.                       | 131 |
|      |  |     | 5.3  | Elementos da espiral.  | 133 |
|      |  |     | 5.4  | Elementos da espiral de transição.   | 138 |
|      |  |     | 5.5a | Elementos para locação da espiral de transição.                              | 151 |
|      |  |     | 5.5b | Procedimento para PI inacessível.  | 152 |
|      |  |     | 5.6  | Curva horizontal circular com transições assimétricas.                       | 158 |
|      |  |     | 5.7  | Concordância de curvas circulares com espiral.                               | 160 |
|      |  |     | 5.8  | Curva composta com transição.  | 161 |
|      |  |     | 6.1a | Valores possíveis de $e_s$ em função da estabilidade.                        | 174 |
|      |  |     | 6.1b | Varição do atrito $f_r$ em função da curvatura ( $V = V_{\text{projeto}}$ ). | 174 |
|      |  |     | 6.2  | Distribuição parabólica da superelevação.                                    | 177 |
|      |  |     | 6.3  | Superelevações para raios acima dos mínimos.                                 | 178 |
|      |  |     | 6.4  | Gráfico de superelevação ( $V = 70 \text{ km/h}$ ).                          | 179 |
|      |  |     | 6.5  | Gráfico de superelevação ( $V = 80 \text{ km/h}$ ).                          | 179 |
|      |  |     | 6.6  | Gráfico de superelevação ( $V = 90 \text{ km/h}$ ).                          | 180 |
|      |  |     | 6.7  | Gráfico de superelevação ( $V = 100 \text{ km/h}$ ).                         | 180 |
|      |  |     | 6.8  | Processos de obtenção da superelevação.                                      | 183 |
|      |  |     | 6.9  | Seções transversais de uma estrada.  | 184 |
|      |  |     | 6.10 | Giro em torno do eixo.   | 185 |
|      |  |     | 6.11 | Esquema mostrando a variação da superelevação.                               | 188 |
|      |  |     | 6.12 | Distribuição da superelevação em bifurcações.                                | 189 |
|      |  |     | 7.1  | Trajatória de um veículo numa curva.   | 197 |

|      |   |     |
|------|---|-----|
| 7.2  | Elementos intervinientes no cálculo da superlargura.            | 198 |
| 7.3  | Distribuição da superlargura numa curva de transição.           | 204 |
| 7.4  | Distribuição da superlargura numa curva circular simples.       | 205 |
| 8.1  | Perfil de uma estrada.  | 210 |
| 8.2a | Parábolas de 2º grau: (a) simples; (b) composta.                | 211 |
| 8.2b | Elementos da parábola de 2º grau composta.                      | 212 |
| 8.3  | Tipos de curvas verticais.                                      | 214 |
| 8.4  | Esquema para cálculo das cotas e flechas da parábola.           | 215 |
| 8.5  | Comprimento mínimo de curvas verticais convexas ( $S \leq L$ ). | 221 |
| 8.6  | Comprimentos de curvas verticais convexas (recomendados).       | 224 |
| 8.7  | Comprimentos de curvas verticais convexas (excepcionais).       | 224 |
| 8.8  | Comprimento mínimo de curvas verticais convexas ( $S > L$ ).    | 225 |
| 8.9  | Comprimento mínimo de curvas verticais côncavas ( $S \leq L$ ). | 228 |
| 8.10 | Comprimento de curvas verticais côncavas (recomendados).        | 230 |
| 8.11 | Comprimento de curvas verticais côncavas (excepcionais).        | 230 |
| 8.12 | Comprimento mínimo de curvas verticais côncavas ( $S > L$ ).    | 231 |
| 9.1  | Prismóide formado num tramo de rodovia.                         | 257 |
| 9.2  | Área de uma seção transversal num terreno plano.                | 258 |
| 9.3  | Seção mista.  | 259 |
| 9.4  | Método analítico para cálculo de áreas.                         | 260 |
| 9.5  | Perfil longitudinal e diagrama de massas.                       | 264 |
| 9.6  | Expansão e contração de solos durante a terraplenagem.          | 266 |
| 9.7  | Onda de Brückner.   | 268 |
| 9.8  | Determinação do ponto de passagem (PP).                         | 269 |
| 9.9  | Momento de transporte.  | 271 |

|       |  |     |
|-------|--|-----|
| 10.1  | Alinhamento horizontal de uma estrada.                                 | 286 |
| 10.2  | Escolha de raios de curvas sucessivas.                                 | 287 |
| 10.3  | Terceira faixa.  | 291 |
| 10.4  | Comprimento crítico de rampa para caminhões de 20 t.                   | 292 |
| 10.5  | Disposição típica de uma faixa adicional de subida.                    | 293 |
| 10.6  | Exemplo hipotético de comprimento de rampa.                            | 296 |
| 10.7  | Curvas de desaceleração para semi-trailer de 23 t.                     | 301 |
| 10.8  | Determinação da distância de aceleração.                               | 303 |
| 10.9  | Determinação da velocidade de caminhões nas rampas.                    | 304 |
| 10.10 | Forças atuando num veículo pesado em rampa.                            | 304 |
| 10.11 | Localização e geometria de faixas auxiliares de subida.                | 308 |
| 10.12 | Diagrama de barras.  | 310 |
| 10.13 | Perfil longitudinal e diagrama de barras.                              | 311 |
| 10.14 | Combinação de alinhamentos.  | 312 |
| 10.15 | Combinação de alinhamentos.  | 313 |
| 10.16 | Combinação de alinhamentos.  | 314 |
| 10.17 | Combinação de alinhamentos.  | 315 |
| 10.18 | Combinação de alinhamentos.  | 316 |
| 11.1  | Tipos de manobras.   | 322 |
| 11.2  | Tipos de conflitos.  | 323 |
| 11.3  | Interseção canalizada de alto padrão (tipo bulbo).                     | 325 |
| 11.4  | Faixas de aceleração (1) e desaceleração (2).                          | 328 |
| 11.5  | Alguns tipos de ramos em interconexões.                                | 334 |
| 11.6  | Recomendações para a definição do tipo de interseções em áreas rurais. | 348 |

## LISTA DE TABELAS

|     |   |     |      |   |     |
|-----|---|-----|------|---|-----|
| 1.1 | Classes de Projeto (Áreas Rurais).  | 26  | 6.1  | Valores dos raios acima dos quais a superelevação é dispensável.  | 181 |
| 2.1 | Largura das faixas de rolamento em tangentes em função do relevo ( $m$ ).               | 47  | 6.2  | Comprimentos mínimos dos trechos de variação da superelevação (pista única, 2 faixas de tráfego de 3,6 $m$ ). | 187 |
| 2.2 | Largura dos acostamentos externos ( $m$ ).  | 47  | 7.1  | Valores de $G_L$ .  | 200 |
| 3.1 | Velocidades de projeto por região.  | 54  | 7.2  | Valores dos raios acima dos quais é dispensável a superlargura.   | 202 |
| 3.2 | Dimensões básicas dos veículos de projeto ( $m$ ).                                      | 56  | 8.1  | Nota de Serviço de Terraplenagem.   | 219 |
| 3.3 | Coefficiente de atrito longitudinal pneu/pavimento ( $V_{\text{diretriz}}$ ).           | 65  | 9.1  | Cálculo de volumes e ordenadas de Brückner.   | 262 |
| 3.4 | Coefficiente de atrito longitudinal pneu/pavimento ( $V_{\text{média}}$ ).              | 65  | 10.1 | Rampas máximas (%).   | 289 |
| 3.5 | Distâncias de visibilidade de ultrapassagem ( $D_{\mu}$ ).                              | 70  | 10.2 | Determinação do início das faixas adicionais e respectivos comprimentos mínimos.                              | 307 |
| 4.1 | Locação de curvas circulares simples.   | 85  | 10.3 | Determinação do final da 3ª faixa para diferentes greides.  | 307 |
| 4.2 | Valores máximos admissíveis para os coeficientes de atrito transversal $f$ .            | 94  | 11.1 | Comprimento de projeto das faixas de mudança de velocidade para greides suaves ( $\leq 2\%$ ).                | 329 |
| 4.3 | Taxas máximas de superelevação admissíveis, $e_{\text{max}}$ .                          | 96  | 11.2 | Variação do comprimento das faixas de mudança de velocidade em função do greide.                              | 330 |
| 4.4 | Problemas típicos de curvas compostas com 2 centros.                                    | 108 |      |   |     |
| 4.5 | Condições mínimas de projeto, para borda dos pavimentos, nas conversões de interseções. | 113 |      |   |     |
| 5.1 | Valores-limite dos raios $R$ acima dos quais podem ser dispensadas curvas de transição. | 131 |      |   |     |
| 5.2 | Locação de curvas de transição.   | 155 |      |   |     |

## CAPÍTULO 1

# CONSIDERAÇÕES GERAIS

*"A paz é a única forma de nos  
sentirmos realmente humanos."*

**ALBERT EINSTEIN**

Cientista alemão

## INTRODUÇÃO

Se entende por projeto geométrico de uma estrada ao processo de correlacionar os seus elementos físicos com as características de operação, frenagem, aceleração, condições de segurança, conforto, etc.

Os critérios para o projeto geométrico de estradas baseiam-se em princípios de geometria, de física e nas características de operação dos veículos. Incluem não somente cálculos teóricos, mas também resultados empíricos deduzidos de numerosas observações e análises do comportamento dos motoristas, reações humanas, capacidade das estradas, entre outras. A construção de uma estrada deve ser tecnicamente possível, economicamente viável e socialmente abrangente.

Muito mais do que uma causa, as estradas devem ser encaradas como uma consequência da civilização. Em todo projeto de engenharia pode-se, em geral, optar entre diversas soluções. Porém, nos projetos de estradas a indeterminação é maior.

É decisivo para a escolha da solução final o critério adotado pelo projetista, a sua experiência e o seu bom senso. Deverá então o projetista escolher os traçados possíveis e em seguida compará-los entre si, atendendo a critérios que ao longo deste livro serão apresentados (raios mínimos de curvas horizontais, inclinações de rampas, curvas verticais, volumes de cortes e aterros, superelevação, superlargura, etc.).

## **ESTUDOS PARA CONSTRUÇÃO DE UMA ESTRADA**

Os trabalhos para construção de uma estrada iniciam-se por meio de estudos de planejamento de transporte. Esses estudos têm por objetivo verificar o comportamento do sistema viário existente para, posteriormente, estabelecer prioridades de ligação com vistas às demandas de tráfego detectadas e projetadas de acordo com os dados sócio-econômicos da região em estudo. As principais atividades para elaboração de um projeto viário são:

- Estudos de tráfego.
- Estudos geológicos e geotécnicos.
- Estudos hidrológicos.

- Estudos topográficos.
- Projeto geométrico.
- Projeto de obras de terra.
- Projeto de terraplenagem.
- Projeto de pavimentação.
- Projeto de drenagem.
- Projeto de obras de arte correntes.
- Projeto de obras de arte especiais.
- Projeto de viabilidade econômica.
- Projeto de desapropriação.
- Projetos de interseções, retornos e acessos.
- Projeto de sinalização.
- Projeto de elementos de segurança.
- Orçamento da obra e plano de execução.
- Relatório de impacto ambiental.

O projeto geométrico de uma estrada comporta uma série de operações que consistem nas seguintes fases: Reconhecimento, Exploração e Projeto. A seguir faremos uma descrição sucinta destas fases.

### **RECONHECIMENTO**

É a primeira fase da escolha do traçado de uma estrada. Tem por objetivo principal o levantamento e a análise de dados da região necessários à definição dos possíveis locais por onde a estrada possa passar. Nesta fase são definidos os principais obstáculos topográficos, geológicos, hidrológicos e escolhidos locais para o lançamento de anteprojetos.

Consideremos a ligação entre dois pontos A e B de uma determinada região, esboçada na figura 1.1.

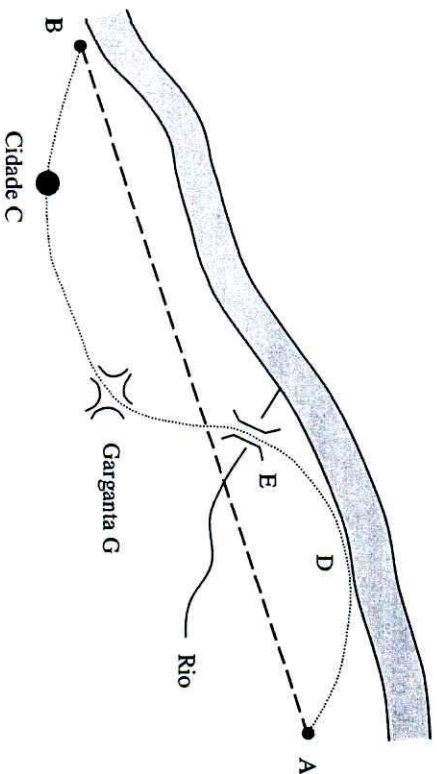


FIGURA 1.1 – Diretriz geral de uma estrada (Fonte: PEREIRA).

Os pontos A e B são denominados pontos extremos. A reta AB, ligando esses pontos, chama-se diretriz geral da estrada. A cidade C e o porto D que serão servidos pela estrada a construir, são conhecidos como pontos obrigados de passagem de condição e são determinados pelo órgão responsável pela construção.

A topografia da região pode impor a passagem da estrada por determinados pontos. A garganta G é um exemplo. Esses pontos chamam-se pontos obrigados de passagem de circunstância. Cada uma das retas que liga dois pontos obrigados intermediários é denominada diretriz parcial.

As tarefas a serem desenvolvidas na fase de reconhecimento consistem basicamente de:

- Coleta de dados sobre a região (mapas, cartas, fotos aéreas, topografia, dados sócio-econômicos, tráfego, estudos geológicos e hidrológicos existentes, etc.).
- Observação do terreno dentro do qual se situam os pontos obrigados de condição (no campo, em cartas ou em fotografias aéreas).
- A determinação das diretrizes geral e parciais, considerando-se apenas os pontos obrigados de condição.
- Escolha dos pontos obrigados de passagem de circunstância.
- Determinação das diversas diretrizes parciais possíveis.
- Seleção das diretrizes parciais que forneçam o traçado mais próximo da diretriz geral.
- Levantamento de quantitativos e custos preliminares das alternativas.
- Avaliação dos traçados.

Os trabalhos de escritório consistem em preparar as plantas e perfis levantados no campo e comparar os diversos estudos realizados, indicando e justificando o traçado mais conveniente para a futura estrada.

As escalas comumente usadas nos desenhos são: planta (1:20.000) e perfil da linha de reconhecimento (1:20.000 Horiz., e 1:2.000 Vert.).

Desenhados os detalhes planimétricos, extraem-se das cadernetas e do perfil os dados que permitem traçar as curvas de nível do relevo do solo da faixa estudada. No reconhecimento não se justifica levantar grandes detalhes topográficos, face ao caráter preliminar dos estudos, que são desenvolvidos a partir de levantamentos de natureza expedita empregando métodos de baixa precisão.

## **EXPLORAÇÃO**

A exploração consiste no levantamento topográfico de uma faixa limitada do terreno, dentro da qual seja possível projetar o eixo da estrada. Nesse levantamento empregam-se métodos e instrumentos muito mais precisos que os utilizados na fase de reconhecimento.

Durante a fase de exploração são desenvolvidos outros estudos, além dos topográficos, tais como: tráfego, hidrologia, geologia, geotecnia, entre outros. Estes estudos possibilitam a elaboração dos anteprojetos de terraplenagem, de drenagem, de pavimentação, geométrico, etc. O lançamento do anteprojeito geométrico segue normalmente a seguinte seqüência:

- Escolha dos pontos de interseção das tangentes (PI) e determinação de suas coordenadas.
- Cálculo do comprimento das tangentes.

- Escolha dos raios das curvas horizontais. A escolha do raio é feita colocando-se diversos gabaritos sobre a planta de modo que as curvas neles representadas tangenciem os dois alinhamentos.
- Dimensionamento das curvas horizontais.
- Estaqueamento do traçado, geralmente de 20 em 20 metros.
- Levantamento do perfil do terreno relativo ao traçado escolhido.
- Escolha dos pontos de interseção das rampas (PIV).
- Determinação das cotas e estacas dos PIV's.
- Cálculo das declividades das rampas.
- Cálculo dos comprimentos das rampas.
- Escolha das curvas verticais.
- Dimensionamento das curvas verticais.

A escala das plantas a serem apresentadas deve ser 1:2.000. O perfil longitudinal do terreno é feito nas escalas 1:2.000 (horizontal) e 1:200 (vertical). As seções transversais, de preferência, são desenhadas na escala 1:100.

Com os dados obtidos nesta fase obtém-se uma avaliação de custos e benefícios de cada umas das soluções propostas e assim escolhe-se entre os diversos anteprojetos o mais adequado.

O detalhamento do projeto geométrico geralmente é feito na fase seguinte.

## PROJETO

É a fase de detalhamento do anteprojecto, ou seja, o cálculo de todos os elementos necessários à perfeita definição do projecto em planta, perfil longitudinal e seções transversais. O projecto final da estrada é o conjunto de todos esses projectos complementado por memórias de cálculo, justificativa de soluções e processos adotados, quantificação de serviços, especificações de materiais, métodos de execução e orçamento.

Uma estrada, quando bem projetada, não deverá apresentar inconvenientes como curvas fechadas e frequentes, greide muito quebrado e com declividades fortes ou visibilidade deficiente. Ao projetar uma estrada deve-se, na medida do possível, evitar essas características indesejáveis. Como regras básicas, leva-se em consideração o seguinte:

- As curvas devem ter o maior raio possível.
- A rampa máxima somente deve ser empregada em casos particulares e com a menor extensão possível.
- A visibilidade deve ser assegurada em todo o traçado, principalmente nos cruzamentos e nas curvas horizontais e verticais.
- Devem ser minimizados ou evitados os cortes em rocha.
- Devem ser compensados os cortes e os aterros.
- As distâncias de transporte devem ser as menores possíveis.

A planta, que é a representação da projecção da estrada sobre um plano horizontal, deverá conter basicamente as seguintes informações:

- Eixo da estrada, com a indicação do estaqueamento e a representação do relevo do terreno com curvas de nível a cada metro.
- Bordas da pista, pontos notáveis do alinhamento horizontal (PC's, PT's, PI's, etc.) e elementos das curvas (raios, comprimentos, ângulos centrais, etc.).
- Localização e limite das obras de arte correntes, especiais e de contenção.
- Linhas indicativas dos *offsets* de terraplenagem (pés de aterro, cristas de corte), dos limites da faixa de domínio, das divisas entre propriedades, nomes dos proprietários, tipos de cultura e indicações de acessos às propriedades.
- Serviços públicos existentes, bem como propostas para sua relocação, se for o caso.

A planta, em geral, é desenhada na escala 1:2.000. Deverão ainda ser executados desenhos suplementares, agrupados por assunto (drenagem, pavimentação, etc.), de forma a permitir uma compreensão clara e objetiva de todos os serviços a serem executados.



O perfil longitudinal, que é a representação da projeção da estrada sobre uma superfície cilíndrica vertical que contém o eixo da estrada em planta, normalmente é desenhado nas escalas 1:2.000 (horizontal) e 1:200 (vertical). Os desenhos deverão indicar:

- O perfil do terreno.
- A linha do greide.
- As estacas dos PIV's, PCV's, PTV's.
- As cotas dos PIV's, PCV's, PTV's.
- Os comprimentos das curvas verticais de concordância.
- As rampas, em porcentagem.
- Os raios das curvas verticais.
- As ordenadas das curvas verticais sob os PIV's.
- As cotas da linha do greide em estacas inteiras e em locais de seções transversais especiais.
- A localização e limites das obras de arte correntes e especiais, com indicação de dimensões e cotas.
- Perfil geológico.

A representação gráfica do perfil longitudinal, preferencialmente, deverá ser feita na mesma folha em que é desenhada a planta, com correspondência de estaqueamento, como mostra a figura 1.2.

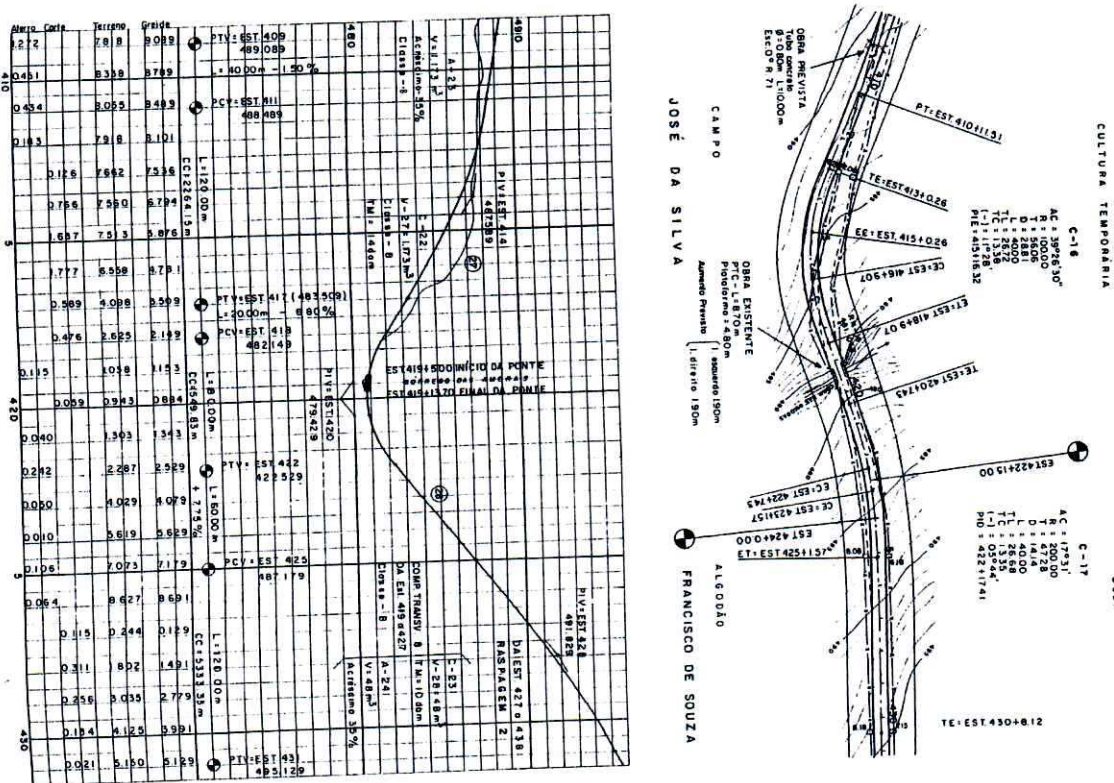


FIGURA 1.2 – Planta e perfil longitudinal de uma estrada  
(Fonte: DER/SP).

As seções transversais são projeções da estrada sobre planos verticais perpendiculares ao eixo. Devem ser desenhadas várias seções-tipo em pontos escolhidos, que permitam a perfeita definição de todas as características transversais do projeto. As seções transversais (figura 1.3) devem conter:

- Dimensões e/ou inclinações transversais dos acostamentos, faixas de tráfego e demais elementos que constituem a plataforma da estrada.
- Taludes de corte e/ou aterro.
- Indicação e localização de obras de arte, dispositivos de drenagem, obras de proteção, etc.
- Áreas de corte e/ou aterro.
- Posição dos *offsets* de terraplenagem e faixa de domínio.
- Outras informações complementares.

### FATORES QUE INFLUEM NA ESCOLHA DO TRAÇADO

São vários os fatores que interferem na definição do traçado de uma estrada.

Dentre eles, destacam-se:

- a topografia da região.
- as condições geológicas e geotécnicas do terreno.
- a hidrologia e a hidrografia da região.
- a presença de benfeitorias ao longo da faixa de domínio.

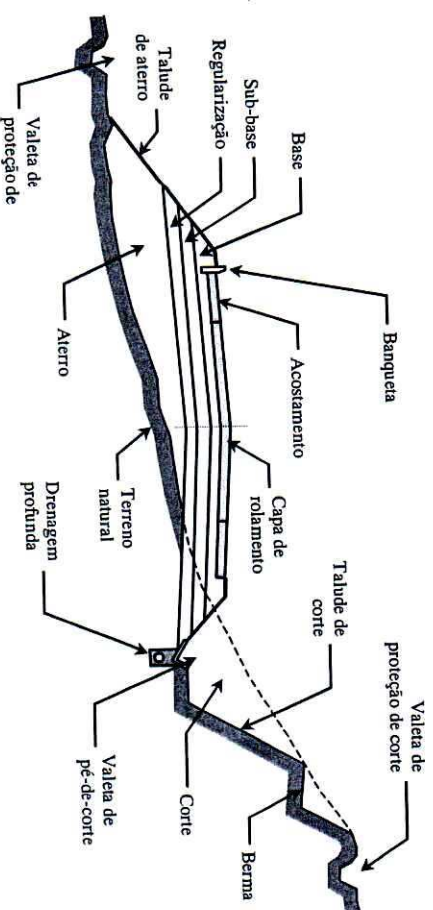


FIGURA 1.3 – Seção transversal de uma estrada.

Regiões topograficamente desfavoráveis geralmente acarretam grandes movimentos de terra, elevando substancialmente os custos de construção.

As condições geológicas e geotécnicas podem inviabilizar determinada diretriz de uma estrada. Na maioria dos casos são grandes os custos necessários para estabilização de cortes e aterros a serem executados em terrenos desfavoráveis (cortes em rocha, aterros sobre solos moles, etc.).

A hidrologia da região pode também interferir na escolha do traçado de uma estrada, pois os custos das obras de arte e de drenagem geralmente são elevados. O mesmo acontece com os custos de desapropriação. Dependendo do número de benfeitorias ao longo da faixa de implantação da estrada, os custos de desapropriação podem inviabilizar o traçado.

**DESENVOLVIMENTO DE TRAÇADOS**

Aparentemente, a melhor solução para a ligação de dois pontos por meio de uma estrada consiste em seguir a diretriz geral. Isto seria possível caso não houvesse entre estes dois pontos nenhum obstáculo ou ponto de interesse que forçasse a desviar a estrada de seu traçado ideal.

Quando a declividade de uma região for íngreme, de modo que não seja possível lançar o eixo da estrada com declividade inferior a valores admissíveis, deve-se desenvolver o traçado. As figuras a seguir mostram alguns exemplos de desenvolvimento de traçados.



FIGURA 1.4 – Desenvolvimento de traçado em ziguezague.

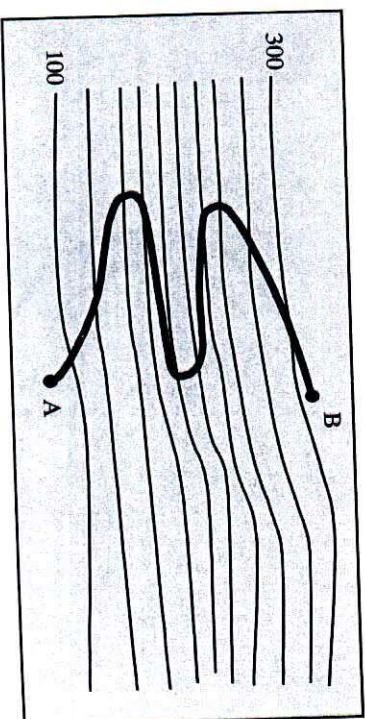


FIGURA 1.5 – Desenvolvimento de traçado em ziguezague.

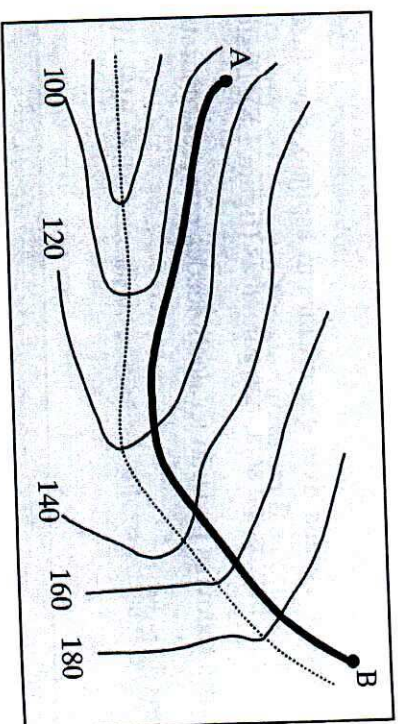


FIGURA 1.6 – Desenvolvimento de traçado acompanhando o talvegue.

Quando o eixo da estrada acompanha as curvas de nível (figura 1.7), há uma redução do volume de material escavado. Esta redução ocorre porque, ao se acompanhar as curvas de nível, a plataforma da estrada cruzará menos com as mesmas. A foto da capa deste livro é um exemplo clássico disso.

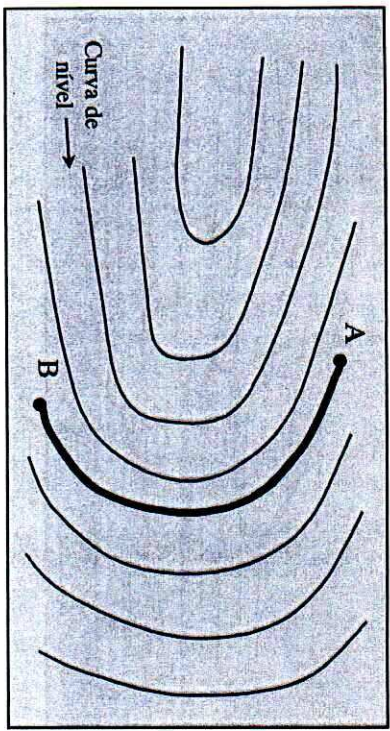


FIGURA 1.7 – Desenvolvimento de traçado acompanhando as curvas de nível.

Quando o eixo da estrada tiver que cruzar um espigão, deve fazê-lo nos seus pontos mais baixos, ou seja, nas gargantas (figura 1.8). Deste modo, as rampas das rodovias poderão ter declividades menores, diminuindo os movimentos de terra.

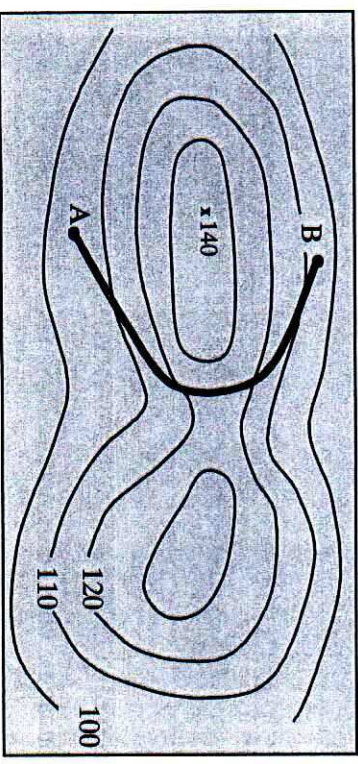


FIGURA 1.8 – Diretriz cruzando espigão pela garganta.

Em regra, a garganta é transposta em corte, a fim de diminuir a declividade média e o desenvolvimento do traçado. Se a garganta for estreita e alta, pode ser transposta em túnel. A encosta pode ser vencida em aterro, contribuindo para a diminuição do traçado. Sendo  $H$  a diferença de cotas entre os pontos A e B da figura 1.9,  $L$  a distância horizontal entre estes pontos,  $i$  a rampa máxima do projeto e  $h$  a altura máxima de corte e aterro, temos:

- se  $H/L < i$ , não é necessário desenvolver o traçado, cortar nem aterrar.
- se  $H/L > i$ , podemos ter:
  - a)  $(H-2h)/L < i$ , caso em que aterrando em B e cortando em A não será necessário desenvolver o traçado.
  - b)  $(H-2h)/L > i$ , é necessário passar em túnel ou desenvolver o traçado.

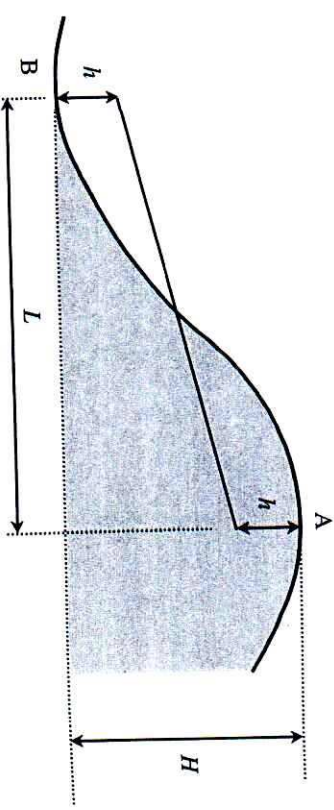


FIGURA 1.9 – Transposição de gargantas.

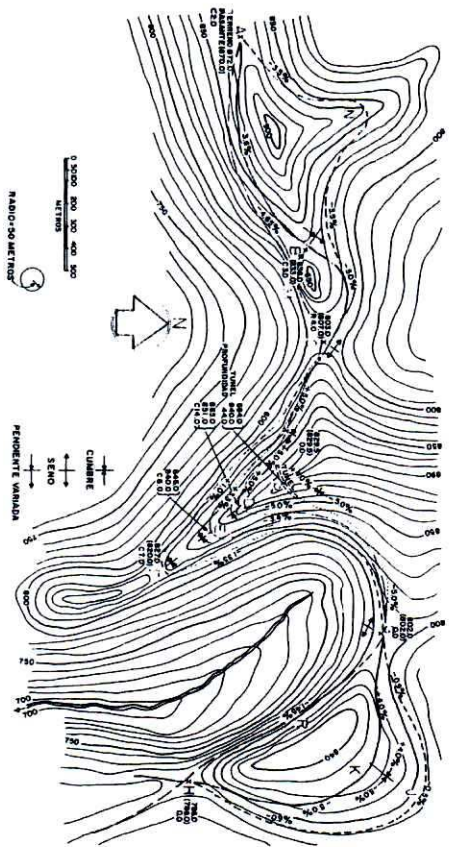


FIGURA 1.10 – Traçado ao longo de uma cadeia de montanhas (Fonte: CARCIENTE).

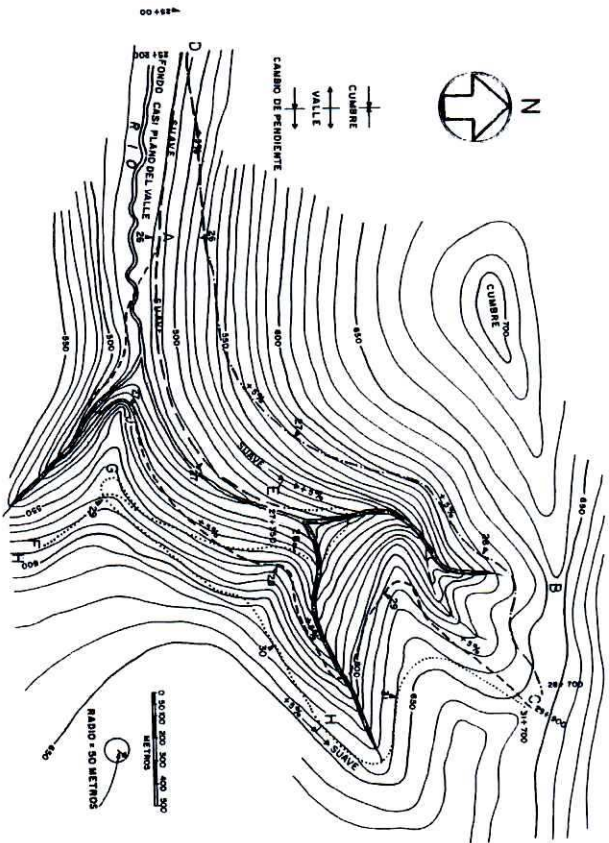


FIGURA 1.11 – Estudo de traçados (Fonte: CARCIENTE).

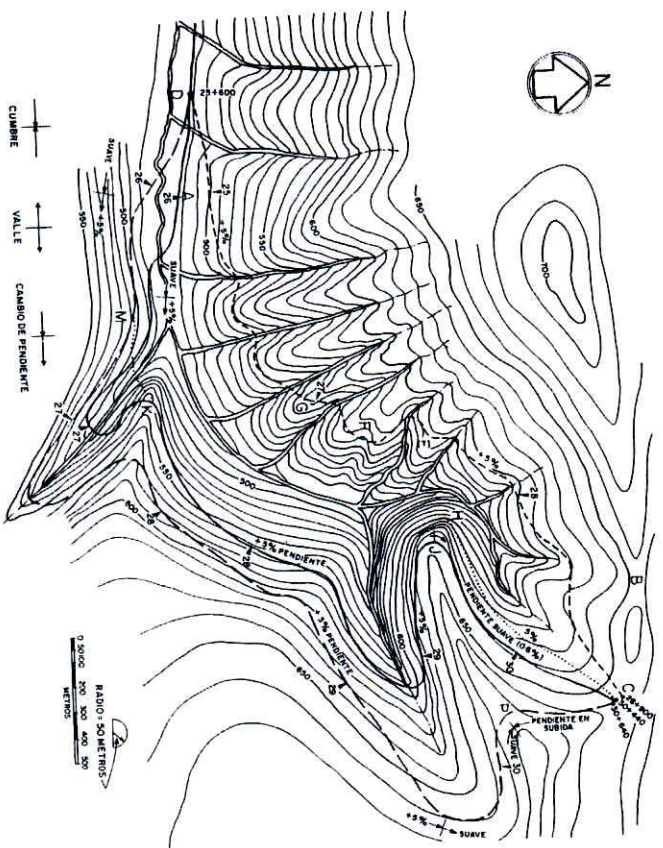


FIGURA 1.12 – Estudo de traçados (Fonte: CARCIENTE).

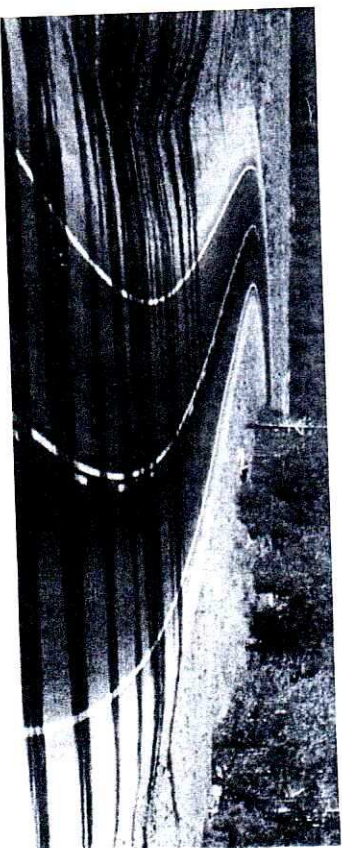


FIGURA 1.13 – Desenvolvimento de traçado em região plana.

## CLASSIFICAÇÃO DAS RODOVIAS

### 1) Quanto à posição geográfica

As estradas federais no Brasil recebem o prefixo BR, acrescido de três algarismos. O primeiro algarismo tem o seguinte significado:

- 0 → rodovias radiais
- 1 → rodovias longitudinais
- 2 → rodovias transversais
- 3 → rodovias diagonais
- 4 → rodovias de ligação

Os dois outros algarismos indicam a posição da rodovia com relação à capital federal e aos limites extremos do País, de acordo com o seguinte critério:

- **RADIAIS:** partem de Brasília, ligando as capitais e principais cidades. Têm a numeração de 010 a 080, obedecendo o sentido horário. Ex.: BR-040 (Brasília-Rio de Janeiro).
- **LONGITUDINAIS:** têm direção geral norte-sul. A numeração varia da direita para a esquerda, entre 100 e 199. Em Brasília o número é 150. Ex.: BR-116 (Fortaleza-Jaguarião).

- **TRANSVERSAIS:** têm direção geral leste-oeste, sendo caracterizadas pelo algarismo 2. A numeração varia de 200 no extremo norte do País a 250 em Brasília, indo até 299 no extremo sul. Ex.: BR-230 (Transamazônica).
- **DIAGONAIS PARES:** têm direção geral noroeste-sudeste (NO-SE). A numeração varia de 300 no extremo nordeste do País a 398 no extremo sudoeste (350 em Brasília). O número é obtido de modo aproximado, por interpolação. Ex.: BR-316 (Belém-Maceió).
- **DIAGONAIS ÍMPARES:** têm direção geral nordeste-sudoeste (NE-SO) e a numeração varia de 301 no extremo noroeste do País a 399 no extremo sudoeste. Em Brasília o número é 351. Ex.: BR-319 (Manaus-Porto Velho).
- **LIGAÇÕES:** em geral essas rodovias ligam pontos importantes das outras categorias. A numeração varia de 400 a 450 se a ligação estiver para o norte de Brasília e, 451 a 499, se para o sul de Brasília. Embora sejam estradas de ligação, chegam a ter grandes extensões, como a BR-407, com 1251 km. Já a BR-488 é a menor de todas as rodovias federais, com apenas 1 km de extensão. Esta rodovia faz a conexão da BR-116 com o Santuário Nacional de Aparecida, no Estado de São Paulo.

Já no Estado de São Paulo, as estradas são classificadas apenas em longitudinais e transversais. São longitudinais as rodovias que interligam pontos do interior do Estado à capital, ou que estão alinhadas em direção à capital, e são codificadas por SP e um número que é o azimute do alinhamento médio, aproximado para número par.

São transversais aquelas que apenas interligam pontos no interior, não alinhados com a direção da capital, e são codificadas por SP e um número correspondente à distância média da rodovia até a cidade de São Paulo, aproximada para valor ímpar, como mostra a figura 1.14.

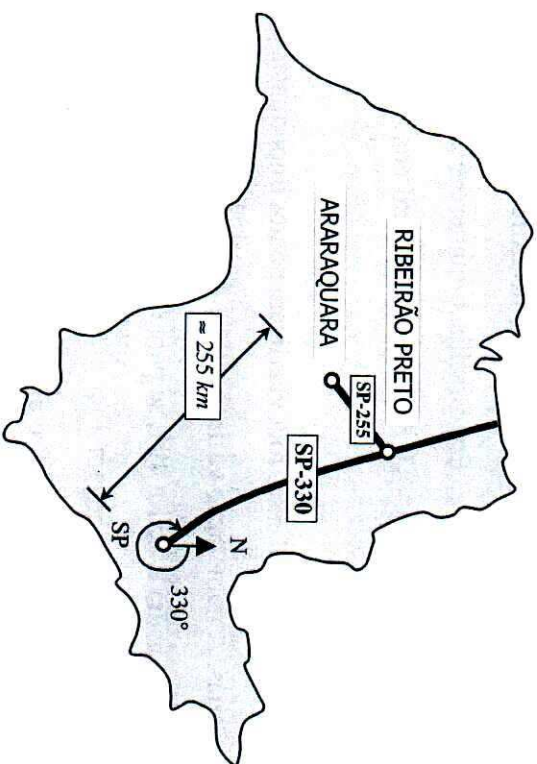


FIGURA 1.14 – Exemplos de rodovias do Estado de São Paulo.

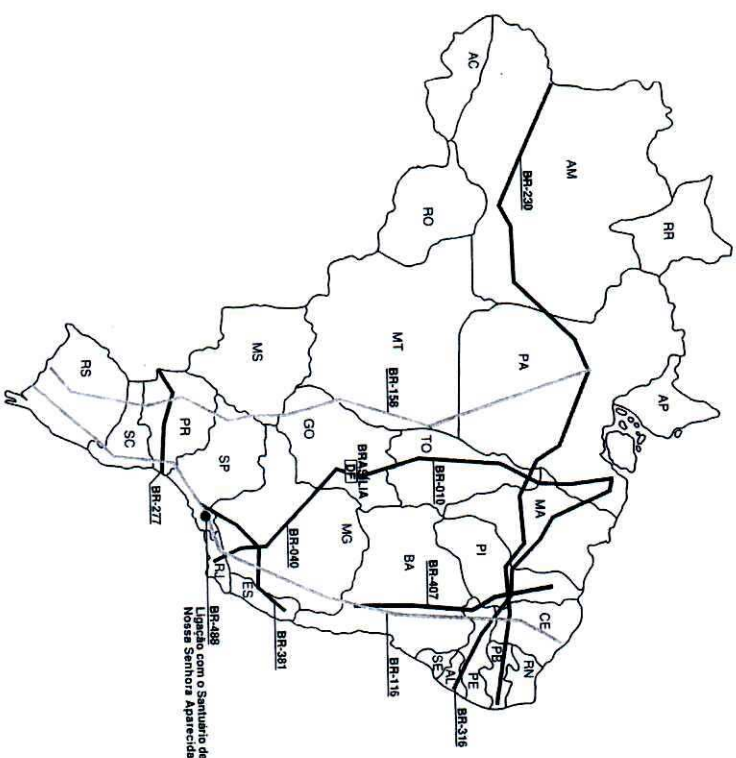


FIGURA 1.15 – Exemplos de rodovias federais.

## 2) Quanto à função

A classificação funcional rodoviária é o processo de agrupar rodovias em sistemas e classes, de acordo com o tipo de serviço que as mesmas proporcionam e as funções que exercem. Quanto à função, as rodovias classificam-se em:

- **ARTERIAIS:** proporcionam alto nível de mobilidade para grandes volumes de tráfego. Sua principal função é atender ao tráfego de longa distância, seja internacional ou interestadual.
- **COLETORAS:** atende a núcleos populacionais ou centros geradores de tráfego de menor vulto, não servidos pelo Sistema Arterial. A função deste sistema é proporcionar mobilidade e acesso dentro de uma área específica.
- **LOCAIS:** constituído geralmente por rodovias de pequena extensão, destinadas basicamente a proporcionar acesso ao tráfego intra-municipal de áreas rurais e de pequenas localidades às rodovias mais importantes.

### 3) Quanto à jurisdição

- **FEDERAIS:** é, em geral, uma via arterial e interessa diretamente à Nação, quase sempre percorrendo mais de um Estado. São construídas e mantidas pelo governo federal.
- **ESTADUAIS:** são as que ligam entre si cidades e a capital de um Estado. Atende às necessidades de um Estado, ficando contida em seu território. Têm usualmente a função de arterial ou coletora.

- **MUNICIPAIS:** são as construídas e mantidas pelo governo municipal. São do interesse de um município ou de municípios vizinhos, atendendo ao município que administra, principalmente.
- **VICINAIS:** são em geral estradas municipais, pavimentadas ou não, de uma só pista, locais, e de padrão técnico modesto. Promovem a integração demográfica e territorial da região na qual se situam e possibilitam a elevação do nível de renda do setor primário. Podem também ser privadas, no caso de pertencerem a particulares.

### 4) Quanto às condições técnicas

As principais características geralmente consideradas nesse tipo de classificação são aquelas que se relacionam diretamente com a operação do tráfego (velocidade, rampas, raios, larguras de pista e acostamento, distância de visibilidade, níveis de serviço, etc.). Estas, por sua vez, são restringidas por considerações de custos, condicionados especialmente pelo relevo.

O tráfego, cujo atendimento constitui a principal finalidade da rodovia, é um dos elementos fundamentais a considerar. Recomenda-se adotar, como critério para a classificação técnica de rodovias, o volume de tráfego que deverá utilizar a rodovia no 10º ano após sua abertura ao tráfego.



Além do tráfego, a importância e a função da rodovia constituem elementos para seu enquadramento em determinada classe de projeto.

As classes de projeto recomendadas encontram-se resumidas na tabela 1.1 a seguir.

TABELA 1.1 – Classes de Projeto (Áreas Rurais).

| CLASSES DE PROJETO | CARACTERÍSTICAS            | CRITÉRIO DE CLASSIFICAÇÃO TÉCNICA <sup>(1)</sup>  |
|--------------------|----------------------------|---|
| 0                  | Via Expressa               | Decisão administrativa  |
|                    | Controle total de acesso   |   |
| I                  | Pista dupla                | Os volumes de tráfego previstos ocasionarem níveis de serviço em rodovia de pista simples inferiores aos níveis C ou D <sup>(2)</sup> |
|                    | Controle parcial de acesso |   |
| II                 | Pista simples              | Volume horário de projeto > 200   |
|                    | Controle parcial de acesso |   |
| III                | Pista simples              | Volume médio diário (VDM) > 1400  |
|                    | Controle parcial de acesso |   |
| IV                 | Pista simples              | VDM entre 700 e 1400  |
|                    | Controle parcial de acesso |   |
| A                  | Pista simples              | VDM entre 300 e 700   |
|                    | Controle parcial de acesso |   |
| B                  | Pista simples              | VDM entre 50 e 200  |
|                    | Controle parcial de acesso |   |
| V                  | Pista simples              | VDM <sup>(3)</sup> entre 50 e 200   |
|                    | Controle parcial de acesso |   |
| VI                 | Pista simples              | VDM <sup>(3)</sup> < 50   |
|                    | Controle parcial de acesso |   |

- Os volumes de tráfego bidirecionais indicados referem-se a veículos mistos e são aqueles previstos no 10º ano após a abertura da rodovia ao tráfego.
- Vide item NÍVEIS DE SERVIÇO.
- Volumes previstos no ano de abertura ao tráfego.

Fonte: DNER

## NÍVEIS DE SERVIÇO

O conceito de nível de serviço está associado às diversas condições de operação de uma via, quando ela acomoda diferentes volumes de tráfego.

O nível de serviço é estabelecido em função da velocidade desenvolvida na via e da relação entre o volume de tráfego e a capacidade da via.

Qualquer seção de uma via pode operar em diferentes níveis de serviço, dependendo do instante considerado. De acordo com o *Highway Capacity Manual*, os diversos níveis de serviço são assim definidos:

- NÍVEL A:** condição de escoamento livre, acompanhada por baixos volumes e altas velocidades. A densidade do tráfego é baixa, com velocidade controlada pelo motorista dentro dos limites de velocidade e condições físicas da via. Não há restrições devido à presença de outros veículos.
- NÍVEL B:** fluxo estável, com velocidades de operação a serem restringidas pelas condições de tráfego. Os motoristas possuem razoável liberdade de escolha da velocidade e ainda têm condições de ultrapassagem.

- **NÍVEL C:** fluxo ainda estável, porém as velocidades e as ultrapassagens já são controladas pelo alto volume de tráfego. Portanto, muitos dos motoristas não têm liberdade de escolher faixa e velocidade.
- **NÍVEL D:** próximo à zona de fluxo instável, com velocidades de operação toleráveis, mas consideravelmente afetadas pelas condições de operação, cujas flutuações no volume e as restrições temporárias podem causar quedas substanciais na velocidade de operação.
- **NÍVEL E:** é denominado também de nível de capacidade. A via trabalha a plena carga e o fluxo é instável, sem condições de ultrapassagem.
- **NÍVEL F:** descreve o escoamento forçado, com velocidades baixas e volumes abaixo da capacidade da via. Formam-se extensas filas que impossibilitam a manobra. Em situações extremas, velocidade e fluxo podem reduzir-se a zero.

## CAPÍTULO 2

# ELEMENTOS GEOMÉTRICOS DAS ESTRADAS

*"A lembrança que um livro deixa é, às vezes,  
mais importante que o livro em si."*

**ADOLFO CASARES**  
Escritor argentino

## INTRODUÇÃO

A geometria de uma estrada é definida pelo traçado do seu eixo em planta e pelos perfis longitudinal e transversal. A figura 2.1 a seguir resume os principais elementos geométricos de uma estrada.

Eixo de uma estrada é o alinhamento longitudinal da mesma. O estudo de um traçado rodoviário é feito com base neste alinhamento. Nas estradas de rodagem, o eixo localiza-se na região central da pista de rolamento.

A apresentação de um projeto em planta consiste na disposição de uma série de alinhamentos retos, concordados pelas curvas de concordância horizontal.

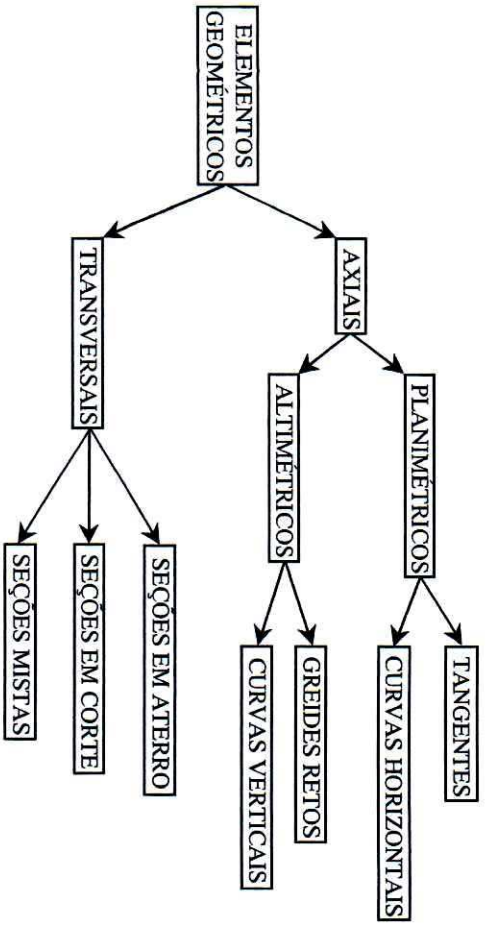


FIGURA 2.1 – Elementos geométricos de uma estrada.

Alinhamentos retos são trechos situados entre duas curvas de concordância.

Por serem tangentes a essas mesmas curvas, são denominados simplesmente tangentes. Os demais alinhamentos retos são chamados de tangentes externas.

Um alinhamento caracteriza-se pelo seu comprimento e pela sua posição relativa (quando se refere à deflexão) ou absoluta (quando se refere ao azimute). Considerando a figura 2.2, temos os seguintes elementos:

- Os trechos retilíneos  $\overline{AB}$ ,  $\overline{DE}$  e  $\overline{GH}$  são as tangentes.
- Os trechos retilíneos  $\overline{BC}$ ,  $\overline{CD}$ ,  $\overline{EF}$  e  $\overline{FG}$  são as tangentes externas.
- $\Delta_1$  e  $\Delta_2$  são os ângulos de deflexão.

- $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  e  $\alpha_3$  são os azimutes dos alinhamentos.
- Os arcos  $\widehat{BD}$  e  $\widehat{EG}$  são os desenvolvimentos das curvas de concordância.

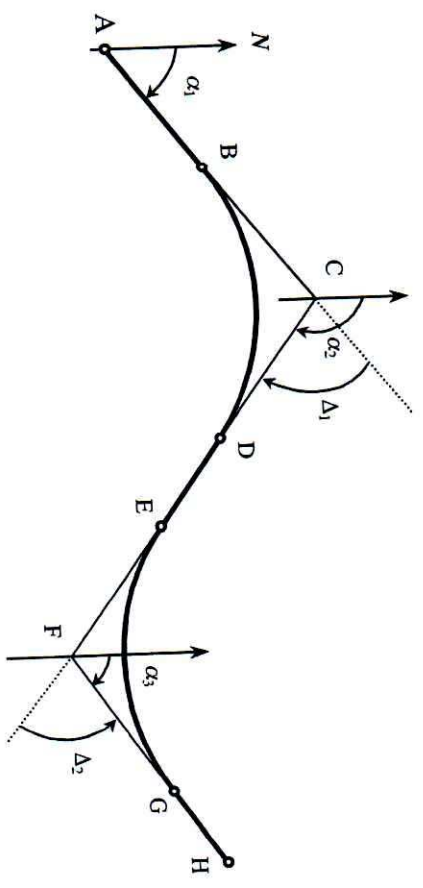


FIGURA 2.2 – Elementos geométricos axiais.

**AZIMUTES E ÂNGULOS DE DEFLEXÃO**

Pode-se calcular o azimute e o comprimento de um alinhamento a partir de suas coordenadas retangulares (N, E), utilizando as equações 2.1, 2.2 e 2.3.

Os azimutes obtidos estão compreendidos entre 0° e 180° porque o traçado das estradas é uma poligonal aberta e nos projetos seus alinhamentos têm desenvolvimento da esquerda para direita.

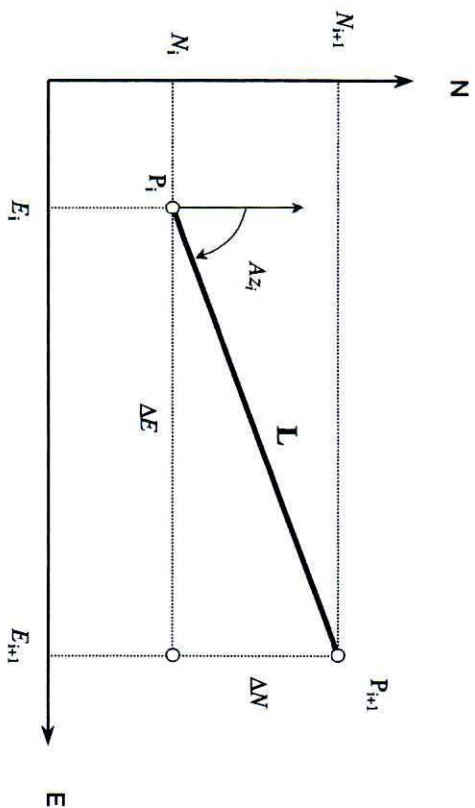


FIGURA 2.3 – Azimute e comprimento de um alinhamento.

Com base na figura 2.3, as seguintes relações podem ser facilmente deduzidas:

$$Az_i = \arctan \left( \frac{E_{i+1} - E_i}{N_{i+1} - N_i} \right) \quad (0^\circ \leq Az_i \leq 90^\circ) \quad (2.1)$$

$$Az_i = 180^\circ + \arctan \left( \frac{E_{i+1} - E_i}{N_{i+1} - N_i} \right) \quad (90^\circ < Az_i \leq 180^\circ) \quad (2.2)$$

$$L = \sqrt{(E_{i+1} - E_i)^2 + (N_{i+1} - N_i)^2} = \sqrt{(\Delta E)^2 + (\Delta N)^2} \quad (2.3)$$

O princípio fundamental para o cálculo das coordenadas retangulares de uma poligonal de estudo é o seguinte:

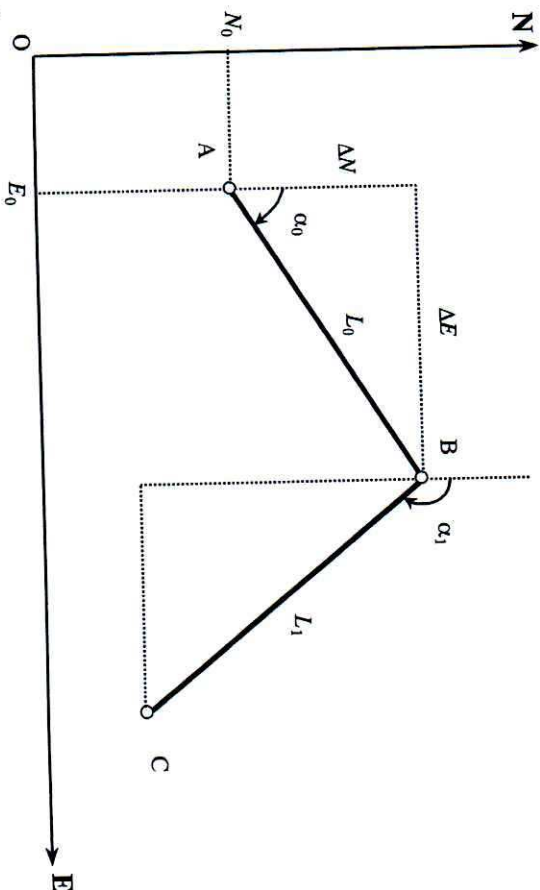


FIGURA 2.4 – Cálculo de coordenadas retangulares.

Sejam A e B dois pontos consecutivos da poligonal, cuja distância é  $L_0$ . Chamando  $N_0$  e  $E_0$  as coordenadas do ponto A e conhecido o azimute do alinhamento AB ( $\alpha_0$ ), tem-se:

$$N_B = N_0 + \Delta N = N_0 + L_0 \cdot \cos \alpha_0$$

$$E_B = E_0 + \Delta E = E_0 + L_0 \cdot \sin \alpha_0$$

Para o ponto C:

$$N_C = N_B + L_1 \cdot \cos \alpha_1$$

$$N_C = N_0 + L_0 \cdot \cos \alpha_0 + L_1 \cdot \cos \alpha_1$$

$$E_C = E_B + L_1 \cdot \sin \alpha_1$$

$$E_C = E_0 + L_0 \cdot \sin \alpha_0 + L_1 \cdot \sin \alpha_1$$

E, em geral, para um ponto de ordem  $i$ :

$$N_i = N_0 + \sum_{n=0}^{i-1} (L_n \cdot \cos \alpha_n) \quad (2.4)$$

$$E_i = E_0 + \sum_{n=0}^{i-1} (L_n \cdot \sin \alpha_n) \quad (2.5)$$

Para o cálculo das coordenadas é necessário o conhecimento dos azimutes de cada alinhamento da poligonal, os quais podem ser deduzidos a partir do azimute do primeiro alinhamento  $\alpha_0$  (em geral obtido por triangulação ou determinação astronômica direta), e dos ângulos de deflexão  $\Delta$ .

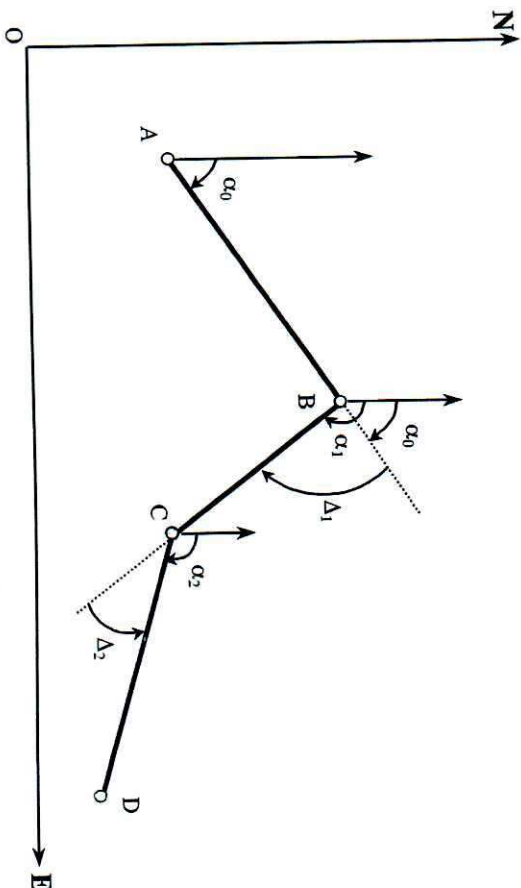


FIGURA 2.5 – Dedução do azimute de um alinhamento.

De posse do primeiro azimute e considerando os elementos da figura 2.5, os demais azimutes são calculados da seguinte maneira:

$$\alpha_1 = \alpha_0 + \Delta_1$$

$$\alpha_2 = \alpha_1 - \Delta_2$$

Generalizando, temos:

$$\alpha_{n+1} = \alpha_n \pm \Delta_{n+1} \quad (2.6)$$

Da expressão 2.6 também se deduz que o ângulo de deflexão entre dois alinhamentos de azimutes conhecidos é igual à diferença entre eles, sendo a deflexão direita ou esquerda, se o resultado for positivo ou negativo, respectivamente.

$$\text{Deflexão} = \text{Azimute}_{n+1} - \text{Azimute}_n$$

(2.7)

Às vezes, dispomos dos rumos ao invés dos azimutes dos alinhamentos. De acordo com o quadrante onde se encontra o rumo, o azimute será:

| QUADRANTE | AZIMUTE                         |
|-----------|---------------------------------|
| NE        | $A_z = \text{Rumo}$             |
| SE        | $A_z = 180^\circ - \text{Rumo}$ |
| SW        | $A_z = 180^\circ + \text{Rumo}$ |
| NW        | $A_z = 360^\circ - \text{Rumo}$ |

## CURVAS DE CONCORDÂNCIA HORIZONTAL

As curvas de concordância horizontal são os elementos utilizados para concordar os alinhamentos retos. Essas curvas podem ser classificadas em:

- **SIMPLES:** quando se emprega apenas arco de círculo.
- **COMPOSTAS COM TRANSIÇÃO:** quando são empregadas as radióides na concordância dos alinhamentos retos (figura 2.6).
- **COMPOSTAS SEM TRANSIÇÃO:** são utilizados dois ou mais arcos de círculo de raios diferentes (figuras 2.7, 2.8a e 2.8b).

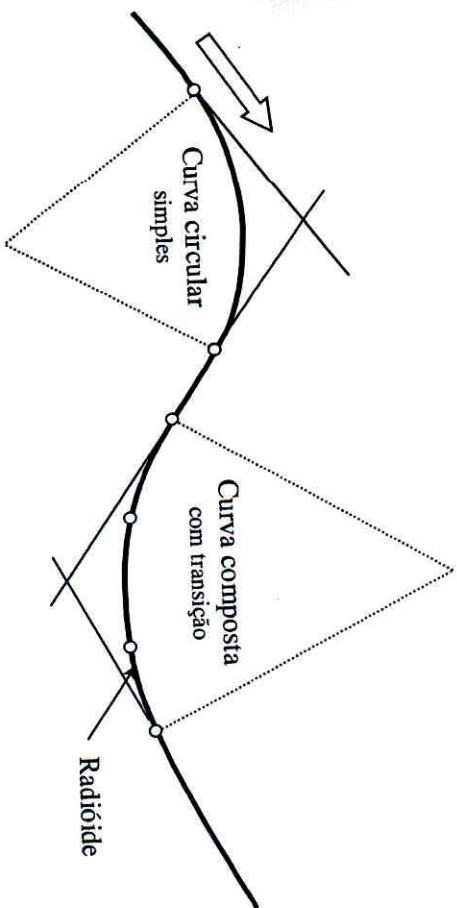


FIGURA 2.6 – Tipos de curvas horizontais.

Quando duas curvas se cruzam em sentidos opostos com o ponto de tangência em comum, recebem o nome de curvas reversas (figura 2.7).

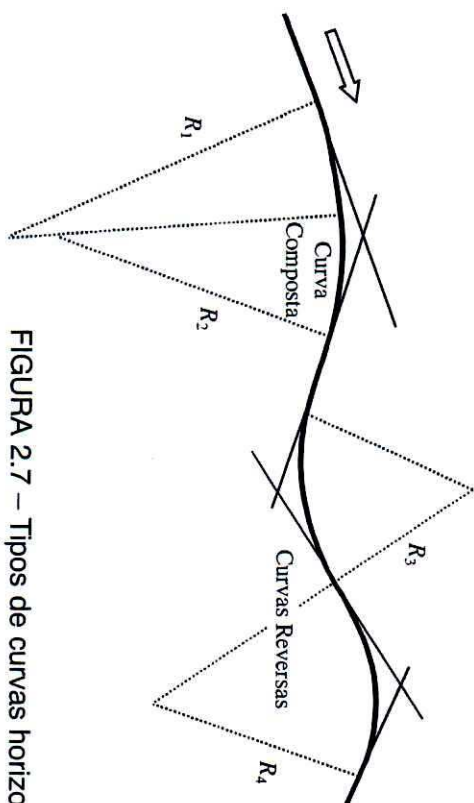


FIGURA 2.7 – Tipos de curvas horizontais.

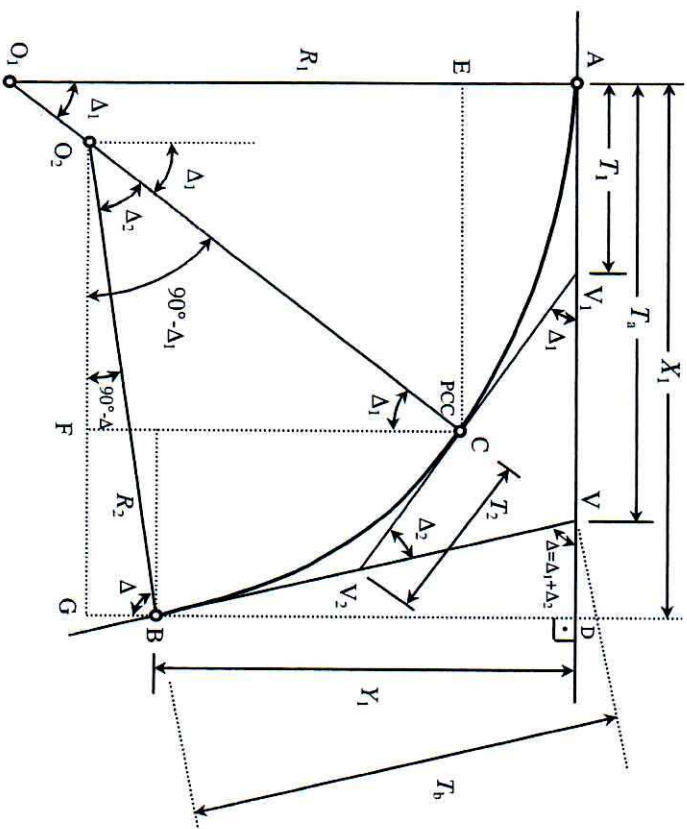


FIGURA 2.8a – Elementos de uma curva composta com dois centros.

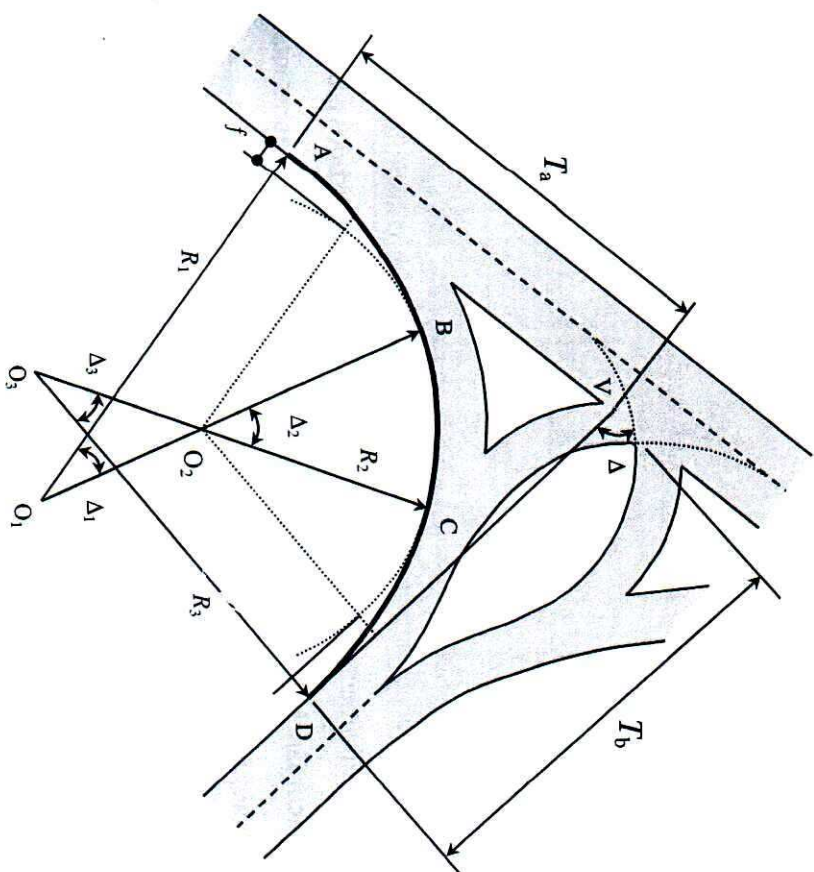


FIGURA 2.8b – Elementos de uma curva composta com três centros.

A AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*) recomenda que a utilização generalizada das curvas circulares compostas nos traçados de rodovias deverá ser evitada sempre que possível. Quando a topografia da região mostrar ser imprescindível o seu uso, a relação entre o raio maior e o raio menor não deverá ser superior a 1,5.

HICKERSON, em seu livro *Route Location and Design*, afirma que as curvas compostas são elementos importantes na adaptação do traçado de uma estrada a uma topografia acidentada, especialmente em terrenos montanhosos.

## GREIDES

A apresentação de um projeto em perfil é também constituída por uma série de alinhamentos retos (elementos altimétricos), concordados por curvas de concordância vertical. O perfil longitudinal do terreno é a representação no plano vertical das diferenças de nível, cotas ou altitudes, obtidas do nivelamento feito ao longo do eixo da estrada (figura 2.9a).

Greide de uma estrada é o conjunto das alturas a que deve obedecer o perfil longitudinal da estrada quando concluída. Os greides são classificados em retos e curvos. São retos quando possuem uma inclinação constante em um determinado trecho. Os greides são curvos quando se utiliza uma curva de concordância para concordar os greides retos, conforme ilustra a figura 2.9a.

A curva normalmente usada para essas concordâncias é a parábola de 2º grau. A figura 2.10 a seguir mostra a classificação dos greides de uma estrada e a figura 2.11 mostra os tipos de greides curvos.

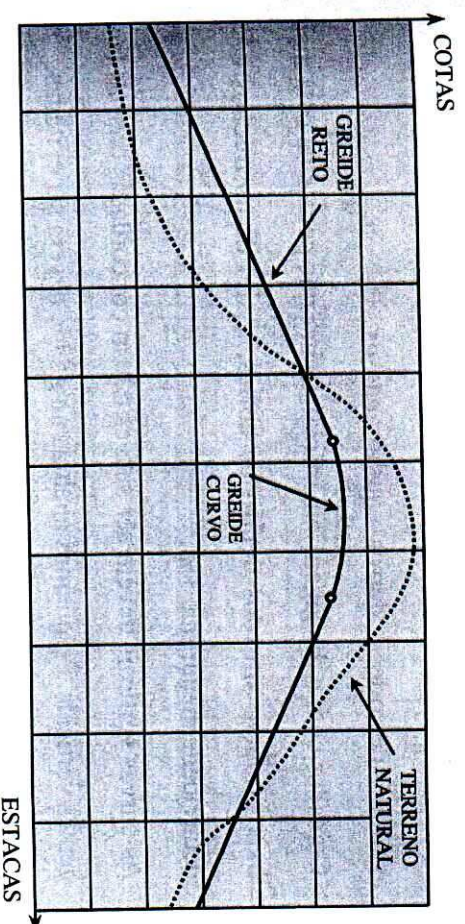


FIGURA 2.9a – Perfil Longitudinal.

No lançamento do greide de uma estrada, algumas condições importantes devem ser observadas, especialmente em relação às rampas máximas e mínimas e às distâncias de visibilidade. Basicamente, as condições são as seguintes, podendo variar de projetista para projetista:

- Minimização das rampas longitudinais. A principal limitação ao emprego de rampas suaves reside no fator econômico, traduzido pelo aumento do custo de construção em regiões topograficamente desfavoráveis (figura 2.9b).
- Deve-se garantir um vão livre de 5,50 m para passagem sobre rodovia federal, de 7,20 m sobre ferrovia e de 2,00 m sobre a máxima enchente verificada nos cursos d'água.



- Otimização das massas. O greide deve ser uma linha que minimize os volumes de cortes e aterros, equilibrando-os.
- Cuidados com a drenagem superficial. Evitar que pontos de cota mais baixa fiquem situados dentro de cortes, assim como trechos com declividade menor que 1%.
- As curvas verticais devem ser suaves e bem concordadas com as tangentes verticais. Freqüentes quebras no greide devem ser evitadas.
- Nas rampas ascendentes longas é preferível colocar rampas maiores no início e diminuí-las no topo, tirando proveito do impulso acumulado no segmento anterior à subida.
- Harmonizar os projetos geométricos horizontal e vertical. Sempre que possível, as curvas verticais devem estar contidas nos trechos de curva horizontal. Isto, além de oferecer melhor aspecto estético tridimensional, aumenta as distâncias de visibilidade em alguns casos.
- Onde houver rampas de comprimento acima do crítico e se o volume de tráfego de veículos lentos for considerável, deve-se prever uma 3ª faixa para uso destes veículos.
- Para maior facilidade no cálculo das ordenadas da curva vertical, deve-se projetar os greides retos de forma que o PIV coincida com estacas inteiras ou intermediárias (+10,00).
- Garantir amplas condições de visibilidade.

- Evitar cortes profundos, principalmente em rochas.

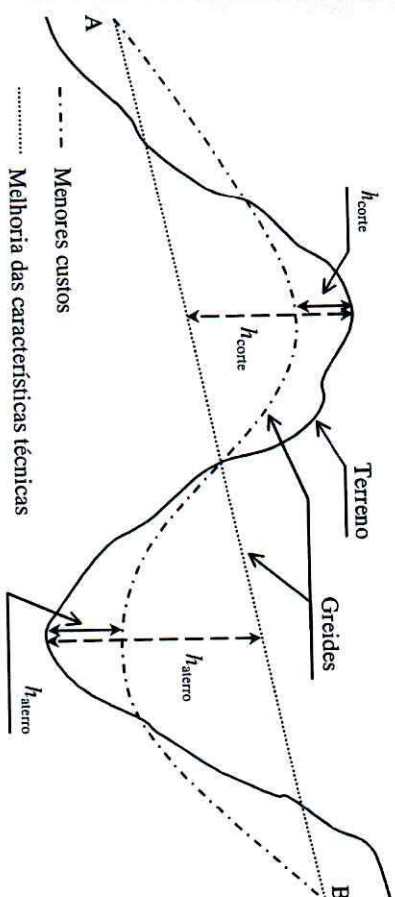


FIGURA 2.9b – Perfil Longitudinal (Fonte: PEIXOTO).

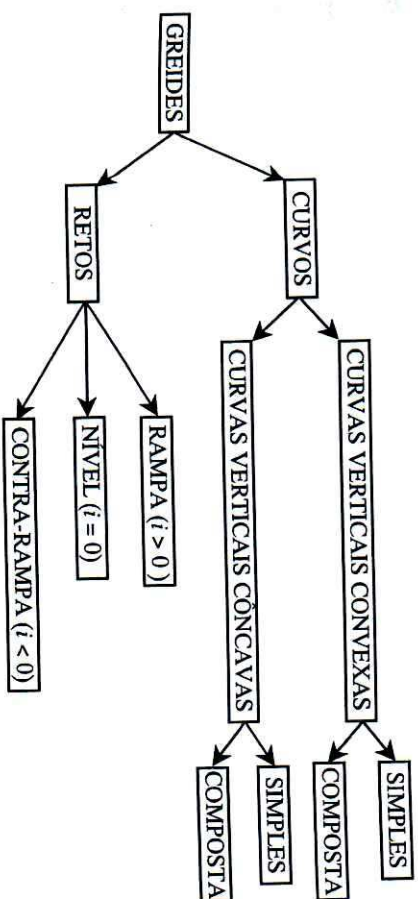


FIGURA 2.10 – Tipos de greides.

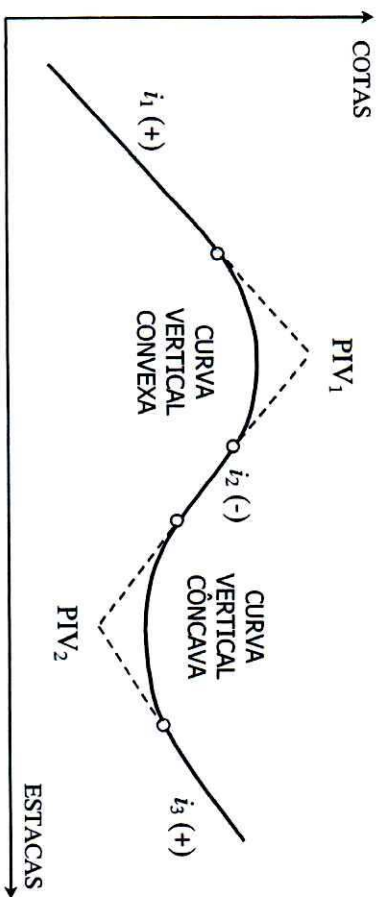


FIGURA 2.11 – Tipos de curvas verticais (greides curvos).

## SEÇÕES TRANSVERSAIS

Seção transversal é a representação geométrica, no plano vertical, de alguns elementos dispostos transversalmente, em determinado ponto do eixo longitudinal da estrada. A seção transversal da estrada poderá ser em corte, aterro ou mista. As figuras 2.12, 2.13 e 2.14 ilustram estes três tipos de seção.

As seções transversais podem ser divididas em comuns e especiais. As comuns são perpendiculares ao eixo, nas estaças inteiras (a cada 20 m), e indicam a linha do terreno natural e a seção projetada, em desenhos feitos de preferência na escala 1:100. Mostram, em cada estaca, com as cotas necessárias, a terraplenagem proposta.

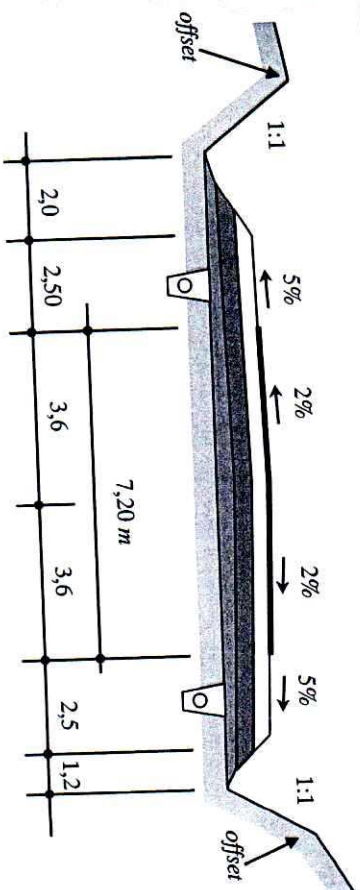


FIGURA 2.12 – Seção em corte.

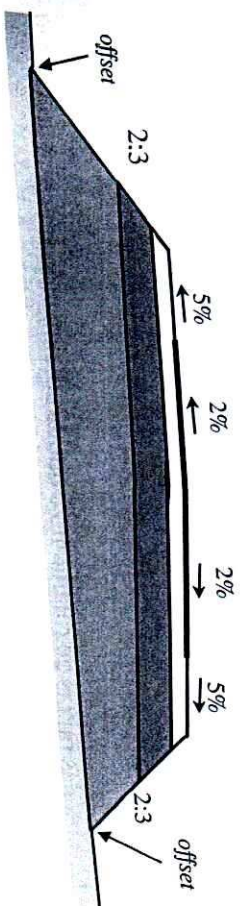


FIGURA 2.13 – Seção em aterro.

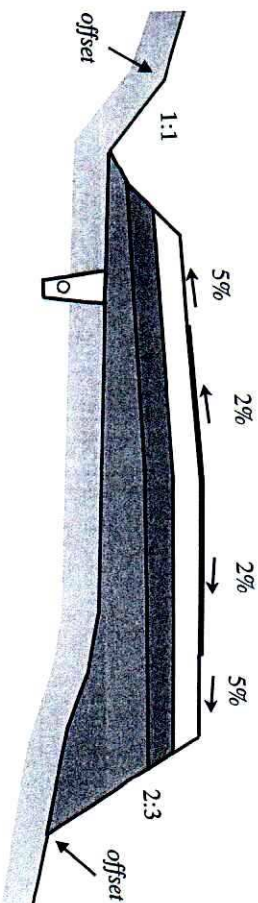


FIGURA 2.14 – Seção mista.

Isto inclui a indicação dos taludes, os limites das categorias de terreno, a faixa de domínio, as cercas, as áreas de corte e aterro e o acabamento lateral da seção para sua adaptação ao terreno adjacente.

Nas estradas, a inclinação transversal mínima aconselhável de um pavimento asfáltico é 2%, e 1,5% no caso de pavimentos de concreto bem executados, podendo essa inclinação ir até 5% no caso de estradas com solo estabilizado. O mais freqüente é o uso de pistas com inclinação transversal constante para cada faixa de rolamento, simétricas em relação ao eixo da estrada. Muitas vezes são usadas pistas com uma única inclinação transversal para todas as faixas, no caso de estradas com pista dupla.

A largura das faixas de rolamento é obtida adicionando à largura do veículo de projeto a largura de uma faixa de segurança, função da velocidade diretriz e do nível de conforto de viagem que se deseja proporcionar. Os valores básicos recomendados para a largura de uma faixa de rolamento pavimentada em tangente estão na tabela 2.1.

Todas as vias rurais deverão possuir acostamentos, pavimentados ou não. Quando pavimentados, os acostamentos contribuem para conter e suportar a estrutura do pavimento da pista. É importante que os acostamentos possuam textura, rugosidade, coloração ou outras características contrastantes com a pista. A tabela 2.2 resume as larguras de acostamentos a serem adotados para as diversas classes de projeto.

TABELA 2.1 – Largura das faixas de rolamento em tangentes em função do relevo (m).

| CLASSES DE PROJETO | RELEVO |          |            |
|--------------------|--------|----------|------------|
|                    | PLANO  | ONDULADO | MONTANHOSO |
| 0                  | 3,60   | 3,60     | 3,60       |
| I                  | 3,60   | 3,60     | 3,50       |
| II                 | 3,60   | 3,50     | 3,30       |
| III                | 3,50   | 3,30     | 3,30       |
| IV-A               | 3,00   | 3,00     | 3,00       |
| IV-B               | 2,50   | 2,50     | 2,50       |

Fonte: DNER

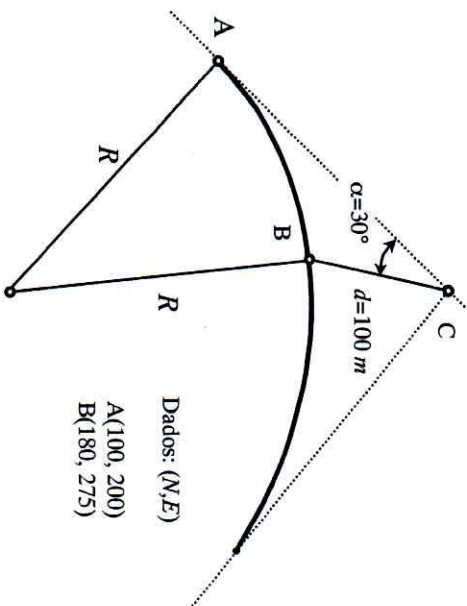
TABELA 2.2 – Largura dos acostamentos externos (m).

| CLASSES DE PROJETO | RELEVO |          |            |
|--------------------|--------|----------|------------|
|                    | PLANO  | ONDULADO | MONTANHOSO |
| 0                  | 3,00   | 3,00     | 3,00       |
| I                  | 3,00   | 2,50     | 2,50       |
| II                 | 2,50   | 2,50     | 2,00       |
| III                | 2,50   | 2,00     | 1,50       |
| IV-A               | 1,30   | 1,30     | 0,80       |
| IV-B               | 1,00   | 1,00     | 0,50       |

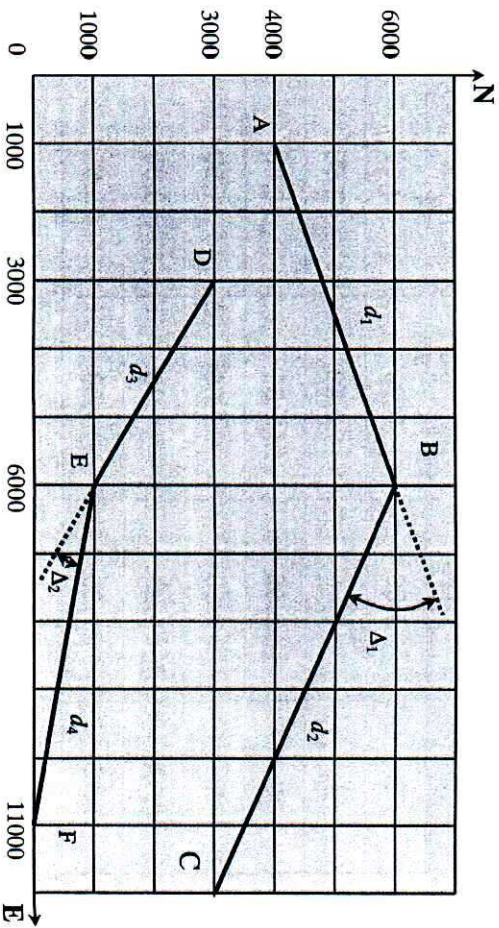
Fonte: DNER

**EXERCÍCIOS**

1. Calcular o raio  $R$  da curva circular da figura abaixo.



2. Calcular os comprimentos e os azimutes dos alinhamentos da figura abaixo. Calcular também os ângulos de deflexão.



3. (Concurso DNER) O azimute é o ângulo, no plano horizontal, de uma direção qualquer com o meridiano. O rumo de  $76^{\circ} 30'$  SE de uma visada a vante corresponde ao azimute de:

- a)  $103^{\circ} 30'$
- b)  $166^{\circ} 30'$
- c)  $256^{\circ} 30'$
- d)  $283^{\circ} 30'$

4. (Concurso DNER) Nos projetos de estradas de rodagem, os perfis longitudinais são desenhados em papel quadriculado ou milimetrado, em escalas horizontais (distâncias) e verticais (cotas), que normalmente guardam uma proporção de:

- a) 10:1
- b) 2:3
- c) 1:10
- d) 3:2

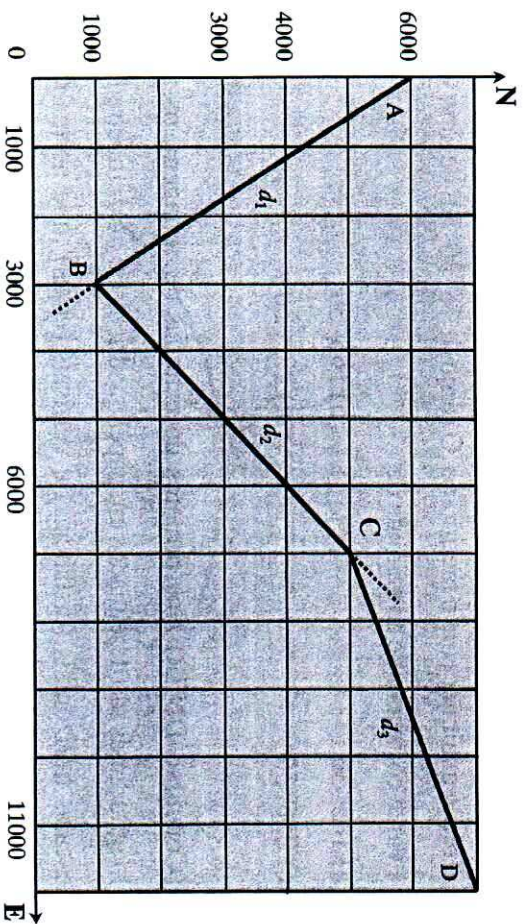
5. (Concurso DNER) Na planta de um projeto, a indicação de escala 1:500 (horizontal) significa que 1 cm no desenho equivale, no terreno, a uma distância de:

- a) 50 m
- b) 5 m
- c) 0,50 m
- d) 0,05 m

6. (Concurso DNER) Numa rodovia de 3.000 metros de comprimento, a numeração final da última estaca é:

- a) 30
- b) 60
- c) 150
- d) 300

7. Calcular os comprimentos e os azimutes dos alinhamentos da figura a seguir. Calcular também os ângulos de deflexão.



## CAPÍTULO 3

# CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS PARA PROJETO

*"Qualquer criança me desbenta dois sentimentos: ternura pelo que é e respeito pelo que poderá vir a ser."*

**LOUIS PASTEUR**  
Químico francês

## INTRODUÇÃO

*OROGRAFIA: as regras do relevo Topográficas.*

Projeto geométrico é a fase do projeto de estradas que estuda as diversas características geométricas do traçado, principalmente em função das leis do movimento, características de operação dos veículos, reação dos motoristas, segurança e eficiência das estradas e volume de tráfego.

Características geométricas inadequadas são causas de acidentes de tráfego, baixa eficiência e obsolescência precoce das estradas. Os diversos elementos geométricos devem ser escolhidos de forma que a estrada possa atender aos objetivos para os quais foi projetada, de modo que o volume de tráfego justifique o investimento realizado.

## VELOCIDADE DE PROJETO

A *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) define velocidade de projeto, ou velocidade diretriz, como a máxima velocidade que um veículo pode manter, em determinado trecho, em condições normais, com segurança.

A velocidade de projeto é a velocidade selecionada para fins de projeto da via e que condiciona as principais características da mesma, tais como curvatura, superelevação e distâncias de visibilidade, das quais depende a operação segura e confortável dos veículos. A velocidade de projeto de um determinado trecho de estrada deve ser coerente com a topografia da região e a classe da rodovia.

Em uma determinada estrada deve-se sempre adotar uma única velocidade de projeto, usando-se velocidades diferentes em casos especiais. A variação acentuada na topografia da região é um motivo para o uso de trechos com velocidades de projeto diferentes. Um dos principais fatores que governam a adoção de valores para a velocidade diretriz é o custo de construção resultante. Velocidades diretrizes elevadas requerem características geométricas mais amplas (principalmente no que se refere a curvas verticais e horizontais, acostamentos e larguras) que geralmente elevam consideravelmente o custo de construção.

Definida a velocidade de projeto, a maioria das características geométricas serão calculadas em função dessa velocidade. Porém, mais importante que a escolha de uma determinada velocidade diretriz, é a manutenção de um padrão homogêneo ao longo de todo o trecho, evitando surpresas para o motorista e conduzindo-o a um padrão também uniforme de operação.

A tabela 3.1 resume os valores das velocidades diretrizes a serem adotadas para as diferentes classes de projeto.

## VELOCIDADE DE OPERAÇÃO

Chama-se velocidade de operação a média de velocidades para todo o tráfego ou parte dele, obtida pela soma das distâncias percorridas dividida pelo tempo de percurso. Pode ser definida também como a mais alta velocidade de percurso que o veículo pode realizar, em uma dada via, sob condições favoráveis de tempo e tráfego, sem exceder a velocidade diretriz. É utilizada nos estudos de capacidade e níveis de serviço da via.

Devido a uma série de fatores, especialmente as condições de tráfego, os veículos não conseguem percorrer toda a estrada na velocidade de projeto. Desta maneira, existem algumas características geométricas, que devem ser determinadas em função da velocidade de operação ao invés da velocidade de projeto.

TABELA 3.1 – Velocidades de projeto por região.

| CLASSES DE PROJETO | VELOCIDADE DE PROJETO (km/h) |          |            |
|--------------------|------------------------------|----------|------------|
|                    | PLANA                        | ONDULADA | MONTANHOSA |
| 0                  | 100                          | 100      | 80         |
|                    | A<br>100                     | 80       | 60         |
| I                  | B<br>100                     | 80       | 60         |
|                    | II<br>80                     | 70       | 50         |
| III                | 70                           | 60       | 40         |
| IV                 | A<br>60                      | 40       | 30         |
|                    | B<br>60                      | 40       | 30         |

Fonte: DNER

$D \leq 10 \text{ m/km}$  → Região plana  
 $10 \text{ m/km} < D \leq 40 \text{ m/km}$  → Região ondulada  
 $D > 40 \text{ m/km}$  → Região montanhosa  
 $D \Rightarrow$  distância entre 2 pontos do terreno.

### VEÍCULOS DE PROJETO

Denomina-se veículo de projeto o veículo teórico de uma certa categoria, cujas características físicas e operacionais representam uma envoltória das características da maioria dos veículos existentes nessa categoria. Essas características condicionam diversos aspectos do dimensionamento geométrico de uma via, tais como:

- A largura do veículo de projeto influencia na largura da pista de rolamento, dos acostamentos e dos ramos de interseções.
- A distância entre eixos influi no cálculo da superlargura e na determinação dos raios mínimos internos e externos das pistas dos ramos.

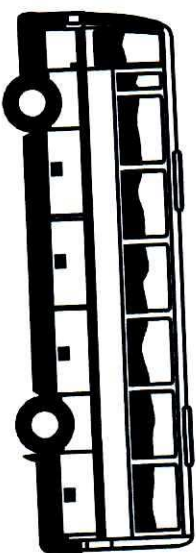
- O comprimento total do veículo influencia a largura dos canteiros, a extensão das faixas de espera, etc.
- A relação peso bruto total/potência influencia o valor da rampa máxima e participa na determinação da necessidade de faixa adicional de subida.
- A altura admissível para os veículos influi no gabarito vertical.

A escolha do veículo de projeto deve levar em consideração a composição do tráfego que utiliza ou utilizará a rodovia, obtida de contagens de tráfego ou de projeções que considerem o futuro desenvolvimento da região.

Existem quatro grupos básicos de veículos, a serem adotados conforme as características predominantes do tráfego (no Brasil, normalmente o veículo

CO):

- VP: Veículos de passeio leves, física e operacionalmente assimiláveis ao automóvel, incluindo utilitários, *pick-ups*, furgões e similares.
- CO: Veículos comerciais rígidos, compostos de unidade tratora simples. Abrangem os caminhões e ônibus convencionais, normalmente de 2 eixos e 6 rodas.



SR: Veículo comercial articulado, composto normalmente de unidade tratora simples e semi-reboque.

O: Representa os veículos comerciais rígidos de maiores dimensões que o veículo CO básico, como ônibus de longo percurso e de turismo, e caminhões longos.

As dimensões básicas dos veículos de projeto estão representadas graficamente nas figuras 3.1a, 3.1b, 3.1c e 3.1d.

A tabela 3.2 resume as principais dimensões básicas dos veículos de projeto recomendados para utilização nos projetos geométricos de rodovias no Brasil.

TABELA 3.2 – Dimensões básicas dos veículos de projeto (m).

| CARACTERÍSTICAS DO VEÍCULO            | VEÍCULO DE PROJETO |      |      |      |
|---------------------------------------|--------------------|------|------|------|
|                                       | VP                 | CO   | O    | SR   |
| Largura total                         | 2,1                | 2,6  | 2,6  | 2,6  |
| Comprimento total                     | 5,8                | 9,1  | 12,2 | 16,8 |
| Raio mínimo da roda externa dianteira | 7,3                | 12,8 | 12,8 | 13,7 |
| Raio mínimo da roda interna traseira  | 4,7                | 8,7  | 7,1  | 6,0  |

Fonte: DNER

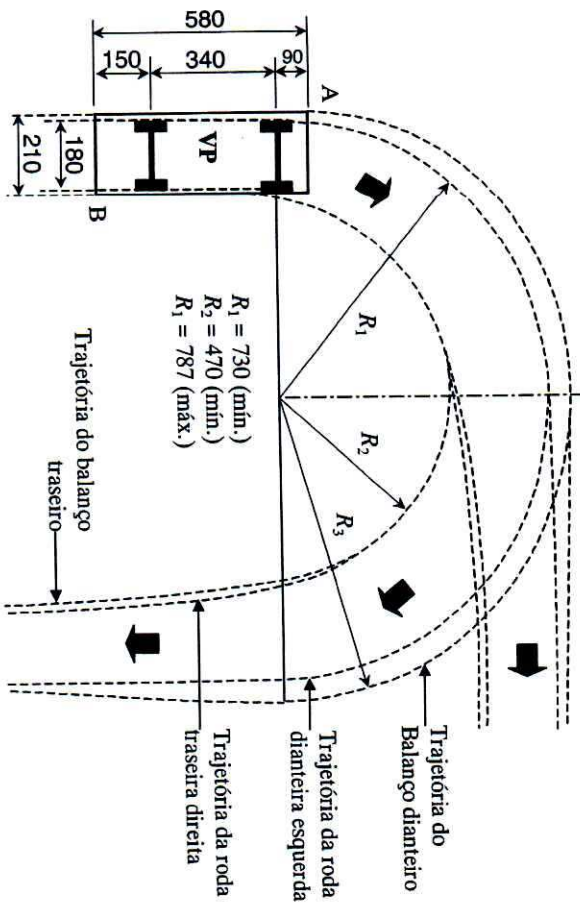


FIGURA 3.1a – Dimensões do veículo de projeto VP (cm).

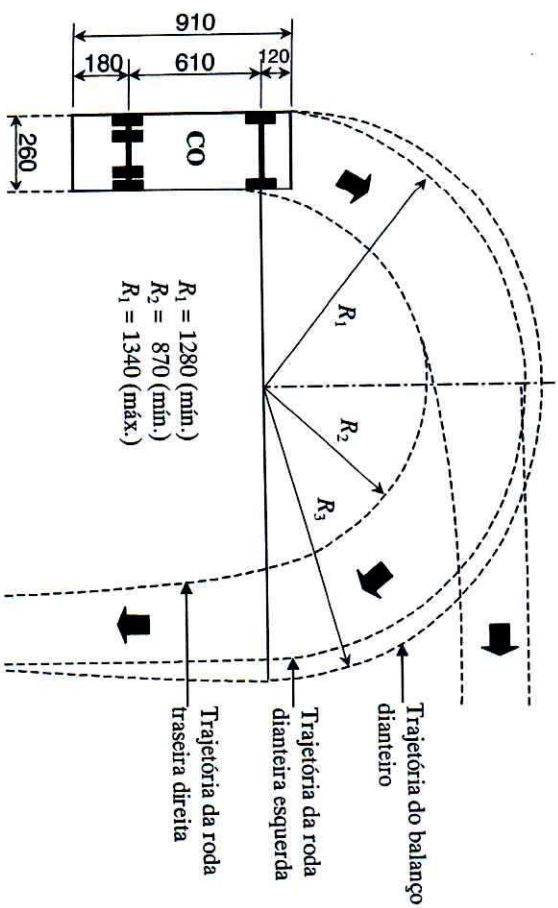


FIGURA 3.1b – Dimensões do veículo de projeto CO (cm).



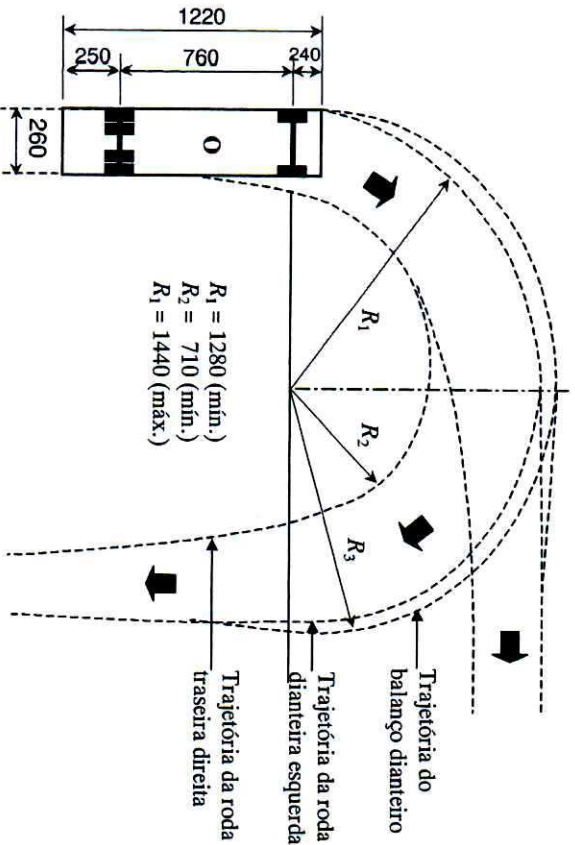


FIGURA 3.1c – Dimensões do veículo de projeto O (cm).

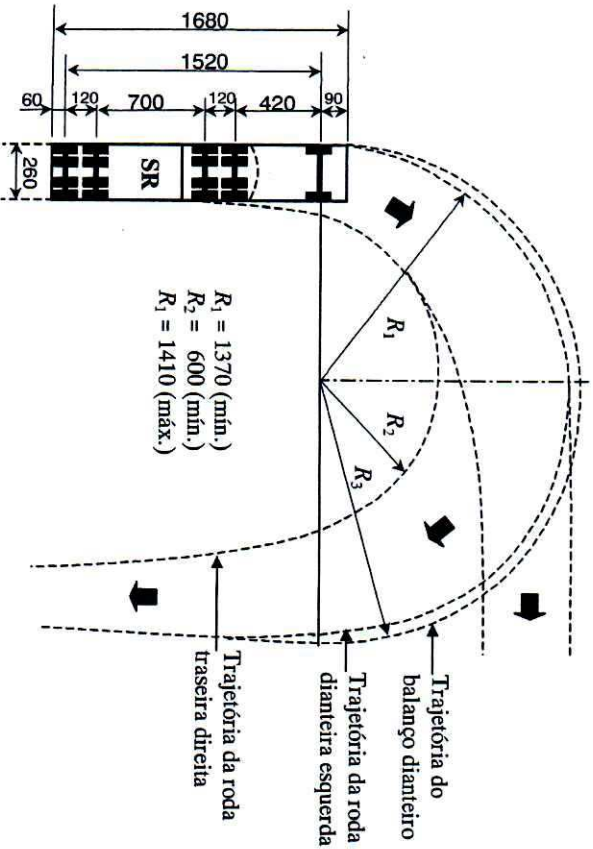


FIGURA 3.1d – Dimensões do veículo de projeto SR (cm).

## DISTÂNCIAS DE VISIBILIDADE

Um dos fatores mais importantes para a segurança e eficiência operacional de uma estrada é a sua capacidade de poder proporcionar boas condições de visibilidade aos motoristas que por ela trafegam.

As distâncias de visibilidade básicas para o projeto geométrico rodoviário são as distâncias de visibilidade de parada e as de ultrapassagem. Segundo o DNER, as distâncias de visibilidade traduzem os padrões de visibilidade a serem proporcionados ao motorista, de modo que este não sofra limitações visuais diretamente vinculadas às características geométricas da rodovia e possa controlar o veículo a tempo, seja para imobilizá-lo, seja para interromper ou concluir uma ultrapassagem, em condições aceitáveis de conforto e segurança.

O projeto de uma estrada deve sempre ser definido de forma que o motorista tenha a melhor visibilidade possível em toda a estrada. A visibilidade é limitada pelas mudanças de direção e declividade ao longo de sua extensão, especialmente pelas curvas horizontais nos trechos em corte e pelas curvas verticais. Em qualquer trecho da estrada, o motorista deverá dispor de visibilidade, tanto em planta como em perfil, para que possa frear o veículo ante a presença de um obstáculo.

A distância de visibilidade é função direta da velocidade. As condições mínimas de visibilidade que um trecho de rodovia deve satisfazer se referem à distância de visibilidade de parada e distância de visibilidade de ultrapassagem, definidas a seguir de acordo com estudos da AASHTO, e adotadas pelo DNER.

### **DISTÂNCIA DE VISIBILIDADE DE PARADA**

É a distância mínima necessária para que um veículo que percorre uma estrada possa parar antes de atingir um obstáculo na sua trajetória. Distinguem-se dois grupos de valores mínimos para as distâncias de visibilidade de parada a serem proporcionadas ao motorista: os valores mínimos recomendados e os valores mínimos excepcionais (ou desejáveis). Os valores recomendados representam o caso normal de emprego. O uso de valores excepcionais está sujeito à aprovação prévia do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem DNER.

No caso do valor mínimo recomendado, a velocidade efetiva de operação do veículo é reduzida, em condições chuvosas, para um valor médio inferior à velocidade diretriz, de acordo com a tabela 3.4. A hipótese adotada para obter os valores excepcionais reflete a tendência dos motoristas de trafegarem o mais rápido possível, com um velocidade igual à velocidade diretriz, mesmo em condições chuvosas.

A distância de visibilidade de parada é a soma de duas parcelas, conforme mostrado na figura 3.2. A primeira parcela,  $D_1$ , é relativa à distância percorrida pelo veículo no intervalo de tempo entre o instante em que o motorista vê o obstáculo e o instante em que inicia a frenagem (tempo de percepção e reação). A segunda parcela,  $D_2$ , é relativa à distância percorrida pelo veículo durante a frenagem.

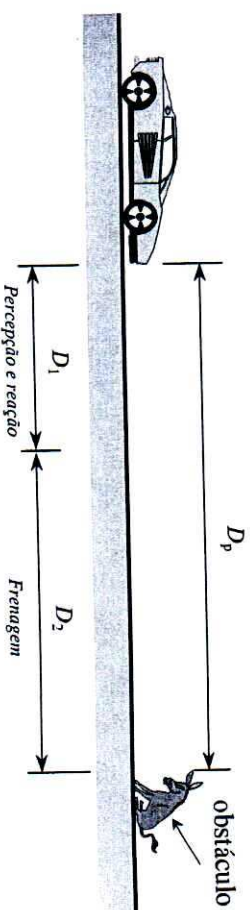


FIGURA 3.2 – Distância de visibilidade de parada.

Quando um motorista vê um obstáculo leva um certo tempo para constatar se o objeto é fixo. Esse tempo depende de vários fatores como condições atmosféricas, reflexo do motorista, tipo e cor do obstáculo, e especialmente, atenção do motorista. A AASHTO, baseada em várias experiências, aconselha o uso do valor de 1,5 segundos para esse tempo de percepção. Adicionando-se a esse valor o tempo necessário à reação de frenagem (1,0 seg.), teremos o tempo total de percepção e reação de  $t = 2,5$  segundos. Logo:

$$D_1 = v \cdot t = 2,5 \cdot v \quad (3.1)$$

Com  $v$  em  $m/s$  e  $D_1$  em metros. Como em projeto geométrico de estradas é comum o uso da velocidade em  $km/h$ , torna-se necessário compatibilizar as unidades da seguinte maneira:

$$D_1 = 2,5 \cdot v(m/s) = 2,5 \cdot \frac{V(km/h)}{3,6} = 0,7 \cdot V \quad (3.2)$$

onde:  $V$  = velocidade de projeto, em  $km/h$ .

$D_1$  = distância percorrida durante o tempo de percepção e reação, em  $m$ .

A segunda parcela corresponde à distância percorrida desde o início da atuação do sistema de frenagem até a imobilização do veículo. Esta distância é chamada de Distância de Frenagem ( $D_2$ ). Para o cálculo de  $D_2$ , basta aplicar alguns conceitos de física. A energia cinética do veículo no início do processo de frenagem deve ser anulada pelo trabalho da força de atrito ao longo da distância de frenagem. Assim, temos:

$$\Delta E_c = \tau_{Fa} \quad (3.3)$$

$$\frac{m \cdot v^2}{2} = P \cdot f \cdot D_2 = m \cdot g \cdot f \cdot D_2 \quad (3.4)$$

$$D_2 = \frac{v^2}{2 \cdot g \cdot f} \quad (3.5)$$

Em unidades usuais, e sendo  $g = 9,8 \text{ m/s}^2$ , a equação 3.5 fica:

$$D_2 = \frac{(V/3,6)^2}{2 \cdot 9,8 \cdot f} = \frac{V^2}{255 \cdot f} \quad (3.6)$$

Quando o trecho da estrada considerada está em rampa, a distância de frenagem em subida será menor que a determinada pela equação 3.6, e maior no caso de descida. Para levar em conta o efeito das rampas é usada a equação abaixo:

$$D_2 = \frac{V^2}{255 \cdot (f + i)} \quad (3.7)$$

Assim, teremos para a distância de visibilidade de parada:

$$D_p = D_1 + D_2 \quad (3.8)$$

$$D_p = 0,7V + \frac{V^2}{255 \cdot (f + i)} \quad (3.9)$$

onde:  $D_p$  = distância de visibilidade de parada, em metros.

$i$  = greide, em  $m/m$  (+, se ascendente; -, se descendente).

$V$  = velocidade de projeto ou de operação, em  $km/h$ .

$f$  = coeficiente de atrito longitudinal pneu/pavimento.

O coeficiente  $f$  exprime a atuação do processo de frenagem, seja a eficiência do sistema de frenagem, seja o esforço reativo longitudinal decorrente do atrito pneu/pavimento no caso de frenagem, considerando o pavimento molhado, em condições superficiais razoáveis (figura 3.3).

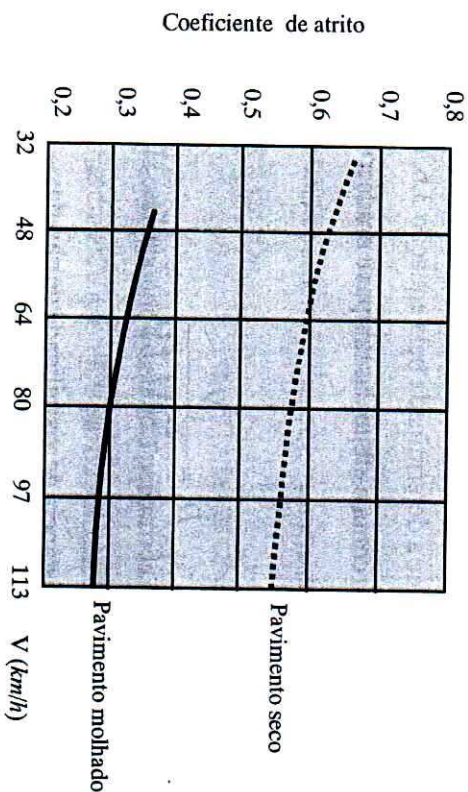


FIGURA 3.3 – Relação entre o coeficiente de atrito longitudinal e a velocidade.

Medidas experimentais mostram que o valor de  $f$  não é o mesmo para qualquer velocidade. Além disso, esse coeficiente também varia com o tipo, pressão e condições dos pneus do veículo, tipo e estado da superfície do pavimento, e especialmente se o pavimento está seco ou molhado. Os valores de  $f$  adotados para projeto, correspondentes à velocidade diretriz estão na tabela 3.3.

TABELA 3.3 – Coeficiente de atrito longitudinal pneu/pavimento ( $V_{\text{diretriz}}$ ).

| $V_{\text{diretriz}}$ (km/h) | 30   | 40   | 50   | 60   | 70   | 80   | 90   | 100  | 120  |
|------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $f = f_L$                    | 0,40 | 0,37 | 0,35 | 0,33 | 0,31 | 0,30 | 0,29 | 0,28 | 0,25 |

Fonte: DNER

Alguns projetistas levam em consideração que em condições chuvosas, a velocidade efetiva do veículo é reduzida para um valor médio inferior à velocidade diretriz, de acordo com a tabela 3.4.

TABELA 3.4 – Coeficiente de atrito longitudinal pneu/pavimento ( $V_{\text{média}}$ ).

| $V_{\text{diretriz}}$ (km/h) | 30   | 40   | 50   | 60   | 70   | 80   | 90   | 100  | 120  |
|------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $V_{\text{média}}$ (km/h)    | 30   | 38   | 46   | 54   | 62   | 71   | 79   | 86   | 98   |
| $f = f_L$                    | 0,40 | 0,38 | 0,36 | 0,34 | 0,32 | 0,31 | 0,30 | 0,30 | 0,28 |

Fonte: DNER

Em todos os cálculos envolvendo a distância de visibilidade de parada, recomenda-se adotar 1,10 metros como a altura dos olhos do motorista em relação ao plano da pista e 0,15 metros como a menor altura de um obstáculo que o obrigue a parar. A distância de visibilidade de parada é utilizada nas interseções, nos semáforos e nas curvas verticais, entre outras aplicações.

**EXEMPLO 1:** Calcular a distância de visibilidade de parada recomendada numa estrada cuja velocidade diretriz é 100 km/h.

**Solução:**

$$D_p = 0,7 \cdot V_{med} + \frac{V_{med}^2}{255 \cdot f} = 0,7 \cdot (86) + \frac{86^2}{255 \cdot (0,30)} \approx 156 \text{ m}$$

**EXEMPLO 2:** Calcular a distância de visibilidade de parada excepcional numa estrada cuja velocidade de projeto é 100 km/h.

**Solução:**

$$D_p = 0,7 \cdot V_{dir} + \frac{V_{dir}^2}{255 \cdot f} = 0,7 \cdot (100) + \frac{100^2}{255 \cdot (0,28)} \approx 210 \text{ m}$$

Denomina-se *Distância Dupla de Visibilidade de Parada* a distância mínima que dois veículos podem parar quando vêm de encontro um ao outro na mesma faixa de tráfego. Ela é utilizada no projeto de curvas verticais convexas de concordância, podendo ser calculada pela expressão:

$$D = 2 \cdot \left[ 0,7 \cdot V + \frac{V^2}{255 \cdot (f + i)} \right]$$

(3.10)

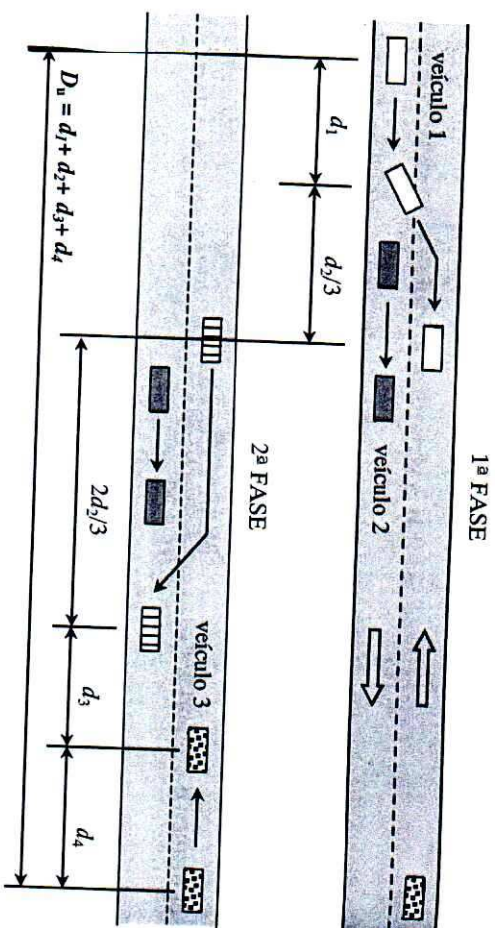
## DISTÂNCIA DE VISIBILIDADE DE ULTRAPASSAGEM

É a distância que deve ser proporcionada ao veículo, numa pista simples e de mão dupla para que, quando estiver trafegando atrás de um veículo mais lento, possa efetuar uma manobra de ultrapassagem em condições aceitáveis de segurança e conforto.

Em rodovias de pista simples e mão dupla, torna-se necessário proporcionar, a intervalos tão frequentes quanto possível, trechos com a distância de visibilidade de ultrapassagem. A frequência dos trechos que proporcionam visibilidade de ultrapassagem, bem como sua extensão, é restringida pelos custos de construção decorrentes.

Porém, quanto mais elevados forem os volumes de tráfego, mais longos e frequentes deverão ser os trechos com essa característica, sob pena do nível de serviço da rodovia cair sensivelmente, em consequência da redução da capacidade.

É recomendado que devam existir trechos com visibilidade de ultrapassagem a cada 1,5 a 3,0 quilômetros e tão extenso quanto possível. É sempre desejável que sejam proporcionadas distâncias superiores, aumentando as oportunidades de ultrapassagem e o número de veículos que a realizam de cada vez. A figura 3.4 mostra o esquema de ultrapassagem.



- $d_1$  = distância percorrida durante o tempo de percepção, reação e aceleração inicial.
- $d_2$  = distância percorrida pelo veículo 1 enquanto ocupa a faixa oposta.
- $d_3$  = distância de segurança entre os veículos 1 e 3, no final da manobra.
- $d_4$  = distância percorrida pelo veículo 3 que tratega no sentido oposto.

FIGURA 3.4 – Esquema de ultrapassagem.

Durante os anos de 1938 a 1941 foram feitas numerosas observações de campo a respeito da manobra de ultrapassagem mostrada na figura 3.4.

Como resultado desses estudos, as distâncias  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $d_3$  e  $d_4$ , são calculadas da seguinte maneira:

**Distância  $d_1$ :** esta distância depende dos seguintes fatores: tempo de percepção e reação e tempo para levar o veículo 1 desde sua velocidade forçada à posição de ultrapassagem. As distâncias percorridas durante estes tempos são:

- a) distância percorrida durante o tempo de percepção e reação:

$$(v - m) \cdot t_1 / 3,6$$

onde:  $v$  = velocidade média do veículo 1, em  $km/h$ .

$m$  = diferença de velocidades entre os veículos 1 e 2, em  $km/h$ .

$t_1$  = tempo necessário para percorrer a distância  $d_1$ , em  $seg$ .

- a) distância percorrida durante o tempo de aceleração:

$$\left( \frac{a \cdot t_1}{2} \right) \cdot \frac{t_1}{3,6}$$

onde:  $a$  = aceleração média do veículo 1, em  $km/h/s$ .

Somando as duas últimas expressões, temos:

$$d_1 = \left( v - m + \frac{a \cdot t_1}{2} \right) \cdot \frac{t_1}{3,6}$$

*Distância*  $d_2$ : esta distância é calculada pela equação:

$$d_2 = \frac{1}{3,6} \cdot v \cdot t_2$$

onde:  $t_2$  = tempo em que o veículo 1 ocupa a faixa oposta, em seg.

$v$  = velocidade média do veículo 1, em km/h.

*Distância*  $d_3$ : distância de segurança, variando de 30 a 90 m.

*Distância*  $d_4$ : distância percorrida pelo veículo 3, que vem em sentido oposto.

Segundo a AASHTO, o valor desta distância é estimado em 2/3 de  $d_2$ .

Os valores da distância de visibilidade de ultrapassagem recomendados pelo DNER estão resumidos na tabela 3.5 e se referem a pistas com greides em nível.

TABELA 3.5 – Distâncias de Visibilidade de Ultrapassagem ( $D_u$ )

|            |     |     |     |     |     |     |     |     |
|------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| $V$ (km/h) | 30  | 40  | 50  | 60  | 70  | 80  | 90  | 100 |
| $D_u$ (m)  | 180 | 270 | 350 | 420 | 490 | 560 | 620 | 680 |

Obs.: Não cabem valores para  $V$  maiores que 100 km/h, só aplicáveis a rodovias de pista dupla.

Fonte: DNER

## CAPÍTULO 4

# CURVAS HORIZONTAIS CIRCULARES

*"Para que servem os livros se não nos conduzem à vida, se não conseguem fazer com que tenhamos dela com mais ardor?"*

**HENRY MILLER**  
Escritor americano

## INTRODUÇÃO

A geometria de uma estrada é definida pelo traçado do seu eixo em planta e pelos perfis longitudinal e transversal. De maneira simplificada, o traçado em planta é composto de trechos retos concordados por curvas horizontais que são usadas, em geral, para desviar de obstáculos que não possam ser vencidos economicamente.

A princípio, uma estrada deve ter o traçado o mais curto possível. Porém, ligeiras deflexões, quando necessárias, podem harmonizar o traçado da estrada com a topografia local.

Geralmente a topografia da região atravessada, as características geológicas e geotécnicas dos solos de fundação, a hidrografia e problemas de desapropriação determinam o uso corrente de curvas horizontais. Escolhido o raio das curvas, as mesmas devem garantir:

- A inscrição dos veículos.
- A visibilidade dentro dos cortes.
- A estabilidade dos veículos que percorrem a via com grandes velocidades.

As curvas horizontais circulares simples são muito empregadas em projeto de estradas. Este tipo de concordância é realizada quando se combinam duas tangentes com um arco de círculo. A figura 4.1 mostra os principais elementos de uma curva circular.

### GEOMETRIA DA CURVA CIRCULAR

Para concordar dois alinhamentos retos, foi há muito, escolhida a curva circular, devido à simplicidade desta curva para ser projetada e locada. O estudo da curva circular é fundamental para a concordância, pois mesmo quando se emprega uma curva de transição, a curva circular continua a ser utilizada na parte central da concordância. A figura a seguir mostra a nomenclatura usada nas curvas horizontais circulares simples.

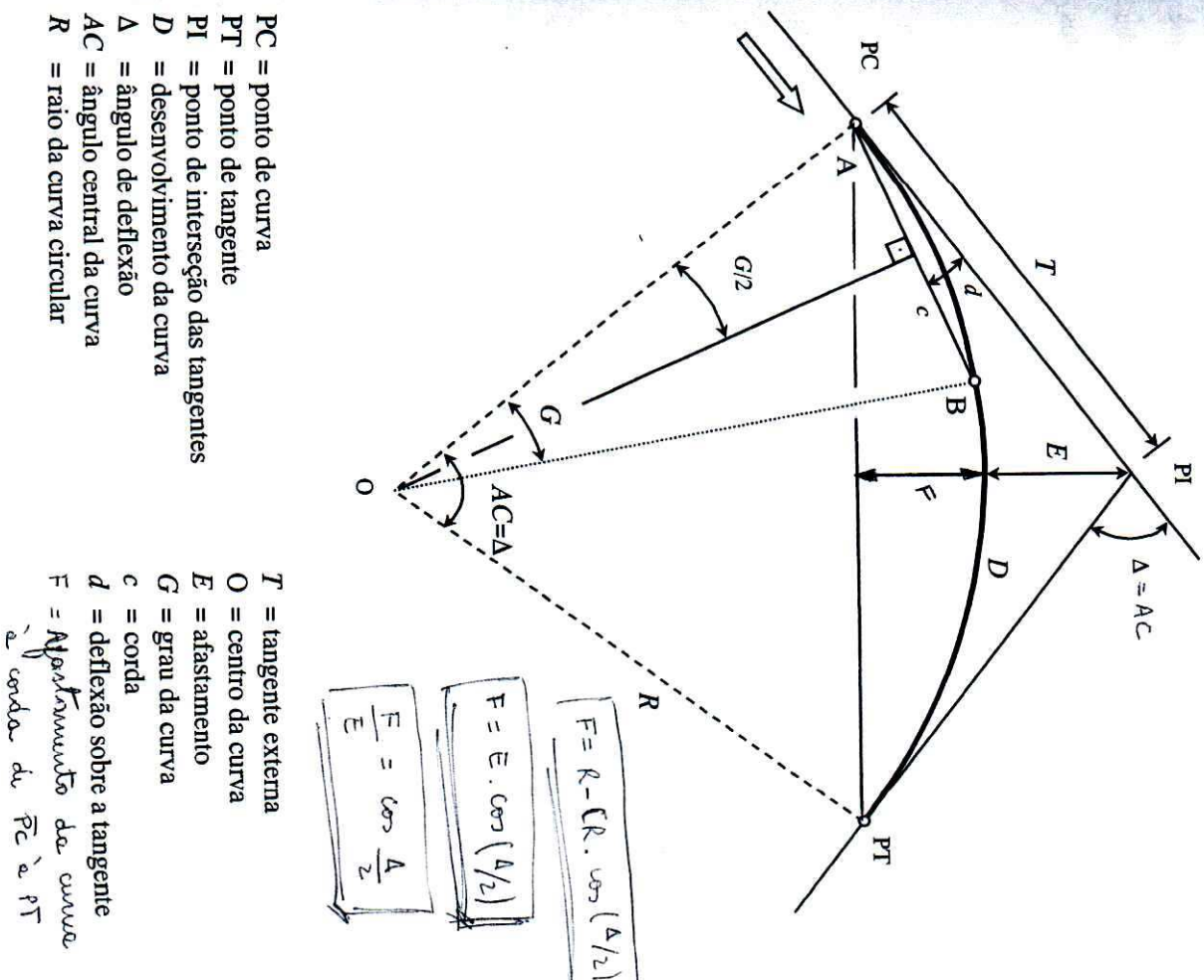
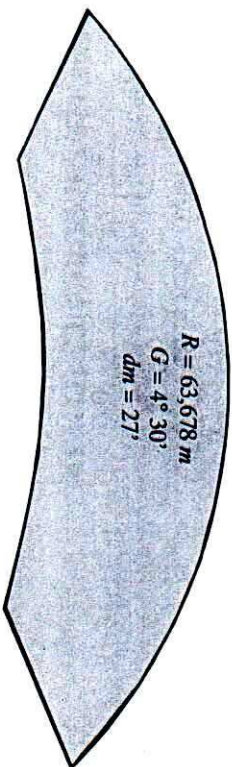


FIGURA 4.1 – Curva horizontal circular simples.



O ponto de início da curva circular denomina-se ponto de curva (PC), que pode ser à direita (PCD) ou à esquerda (PCE). A outra extremidade recebe o nome de ponto de tangente (PT). São os seguintes os principais elementos da curva circular:

- **RAIO (R):** é o raio do arco de círculo empregado na concordância, expresso em metros. É um elemento selecionado por ocasião do projeto, de acordo com as características técnicas da rodovia e a topografia da região. A escolha do valor do raio pode ser feita também por meio de gabaritos, que representam, na escala da planta, trechos de curvas circulares de diversos raios, de valores convenientemente escalonados.

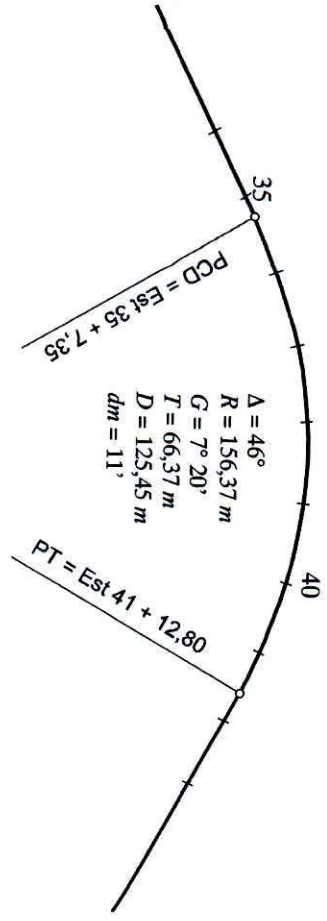


- **ÂNGULO CENTRAL (AC):** é o ângulo formado pelos raios que passam pelo PC e PT e que se interceptam no ponto O. Pode-se demonstrar facilmente que o ângulo central é numericamente igual à deflexão entre os alinhamentos ( $AC = \Delta$ ).

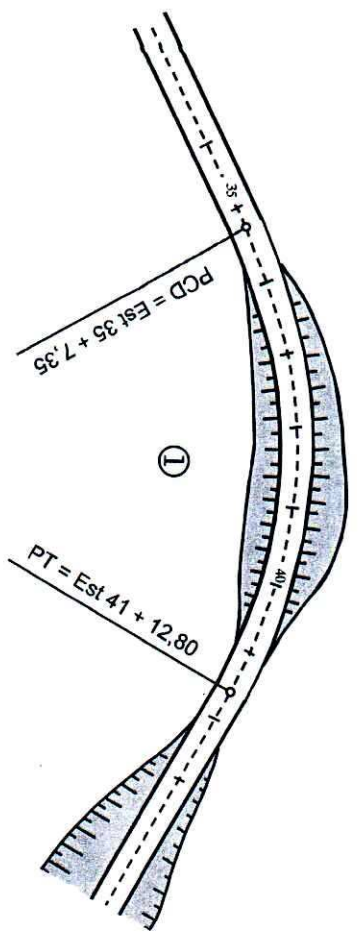
- **TANGENTE (T):** segmentos de reta que unem os pontos de curva (PC) e de tangente (PT) ao ponto de interseção (PI).
- **DESENVOLVIMENTO (D):** é o comprimento do arco de círculo, desde o PC até o PT.
- **GRAU DA CURVA (G):** é o ângulo central que corresponde a uma corda de comprimento  $c$ . O grau é independente do ângulo central.
- **AFASTAMENTO (E):** é a distância entre o PI e o ponto médio da curva.
- **DEFLEXÃO POR METRO (dm):** ângulo formado entre a tangente  $T$  e uma corda de comprimento  $c = 1\text{ m}$  que parta do PC.

As indicações usuais nas folhas de projeto são as seguintes, podendo variar de projetista para projetista:

- Numeração das estacas múltiplas de 5.
- A indicação do PC e PT com o número das respectivas estacas são escritos ao longo dos raios extremos da curva.
- Na parte interna colocam-se os valores dos principais elementos da curva ( $R, \Delta, G, T, D, dm$ ).



Costuma-se também indicar cortes ou aterros, e enquadrar o eixo da estrada entre dois traços paralelos, cujo afastamento é igual à largura da plataforma. Os valores dos principais elementos das curvas podem ser colocados em tabelas no rodapé da folha de projeto.



| CURVA | $\Delta$ | R (m)  | T (m) | D (m)  | dm (') | E(PC)     | E(PT)      |
|-------|----------|--------|-------|--------|--------|-----------|------------|
| ①     | 46°      | 156,37 | 66,37 | 125,45 | 11     | 35 + 7,35 | 41 + 12,80 |

As principais relações entre alguns elementos geométricos da curva circular simples, indispensáveis tanto no projeto quanto na locação, são as seguintes:

$$\tan\left(\frac{\Delta}{2}\right) = \frac{T}{R} \quad \therefore \quad T = R \cdot \tan\left(\frac{\Delta}{2}\right) \quad (4.1)$$

$$\cos\left(\frac{\Delta}{2}\right) = \frac{R}{R+E} \quad \therefore \quad E = R \cdot \left[ \sec\left(\frac{\Delta}{2}\right) - 1 \right] \quad (4.2)$$

$$AC = \Delta = \frac{D \cdot 180^\circ}{R \cdot \pi} \quad \therefore \quad D = \frac{\pi \cdot R \cdot \Delta}{180^\circ} \quad (4.3)$$

Combinando as equações 4.1 e 4.2 chega-se facilmente à seguinte relação:

$$E = T \cdot \tan\left(\frac{\Delta}{4}\right) \quad (4.4)$$

As estacas dos pontos PC e PT são determinadas pelas equações abaixo<sup>1</sup>:

$$E(PC) = E(PT) - [T] \quad (4.5a)$$

$$E(PT) = E(PC) + [D] \quad (4.5b)$$

<sup>1</sup> A notação [T] significa: valor da tangente T, em estacas.

Uma curva pode ser definida pelo raio ou pelo grau. Pode-se facilmente obter uma expressão que relacione esses dois elementos. Considerando a figura 4.1, temos:

$$\text{arco}(AB) = \frac{\pi \cdot R \cdot G}{180^\circ} \quad \therefore \quad G = \frac{180^\circ \cdot \text{arco}(AB)}{\pi \cdot R} \quad (4.6)$$

Substituindo o comprimento do arco  $\text{arco}(AB)$  pela corda  $c$ , chega-se à expressão:

$$G = \frac{180^\circ \cdot c}{\pi \cdot R} \quad (4.7)$$

Quando se faz a substituição do comprimento do arco de uma curva pela sua respectiva corda se comete um erro, cuja grandeza passa a ser mais significativa à medida que se aumenta o comprimento da corda.

Se adotarmos cordas de 20 metros para  $R \geq 180 \text{ m}$ , cordas de 10 metros para  $65 \leq R < 180$ , cordas de 5 metros para  $25 \leq R < 65$  e cordas de 2 metros para  $R < 25 \text{ m}$ , o erro será menor que 0,01 m, portanto, desprezível. Utilizando uma corda  $c = 20 \text{ m}$ , a equação 4.7 fica:

$$G_{20} = \frac{1145,92}{R} \quad (4.8)$$

O grau  $G_{20}$  deve ser múltiplo de 40' para facilitar a locação. A seqüência utilizada é a seguinte:

1. Adota-se  $R'$  (provisório)  $> R_{\min}$ .
2. Calcula-se  $G' = 1145,92/R'$ .
3. Adota-se  $G$ , múltiplo de 40', próximo a  $G'$ .
4. Calcula-se  $R = 1145,92/G$ .

Outra expressão que fornece o valor do grau da curva pode ser obtida considerando a seguinte proporção:

$$G : c = \Delta : D \quad \therefore \quad G = \frac{c \cdot \Delta}{D} \quad (4.9)$$

Na figura 4.1, sendo  $\overline{AB} = c$ , tem-se:

$$\frac{c}{2} = R \cdot \text{sen} \left( \frac{G}{2} \right) \quad \therefore \quad G = 2 \cdot \text{arcsen} \left( \frac{c}{2R} \right) \quad (4.10)$$

e, para  $c = 20 \text{ m}$ :

$$G_{20} = 2 \cdot \text{arcsen} \left( \frac{10}{R} \right)$$

Aplicando alguns conceitos de geometria, pode-se verificar facilmente na figura 4.1 que os valores da deflexão sobre a tangente são dados por:

$$d = \frac{G}{2} \quad (4.11)$$

Para o cálculo da deflexão por metro, basta dividir a deflexão sobre a tangente pelo valor da corda  $c$ :

$$dm = \frac{G}{2 \cdot c} \quad (4.12)$$

para  $c = 20 \text{ m}$ :

$$dm = \frac{G_{20}}{40}$$

Recomenda-se adotar valores inteiros para a deflexão por metro, para facilitar as leituras dos ângulos de deflexão para a locação da curva.

**EXEMPLO 1:** Dado  $R' = 300 \text{ m}$ , calcular um novo raio  $R > R'$  de modo que o grau da curva seja múltiplo de  $40'$ .

**Solução:**

$$G'_{20} = \frac{1145,92}{R'} = \frac{1145,92}{300} = 3,82' = 229,20'$$

Adotando  $G_{20} = 200' = 3^\circ 20' = 3,333333^\circ$ , temos:

$$R = \frac{1145,92}{G_{20}} = \frac{1145,92}{3,333333^\circ} = 343,78 \text{ m}$$

**EXEMPLO 2:** Numa curva horizontal circular, temos:  $\Delta = 45,5^\circ$ ,  $R = 171,98 \text{ m}$  e  $E(\text{PI}) = 180 + 4,12$ . Determinar os elementos  $T, D, E, G_{20}$ ,  $d, dm, E(\text{PC})$  e  $E(\text{PT})$ .

**Solução:**

$$T = R \cdot \tan\left(\frac{\Delta}{2}\right) = 171,98 \cdot \tan\left(\frac{45,5^\circ}{2}\right) = 72,12 \text{ m}$$

$$D = \frac{\pi \cdot R \cdot \Delta}{180^\circ} = \frac{\pi \cdot 171,98 \cdot 45,5^\circ}{180^\circ} = 136,55 \text{ m}$$

$$E = R \cdot \left[ \sec\left(\frac{\Delta}{2}\right) - 1 \right] = 171,98 \cdot \left[ \sec\left(\frac{45,5^\circ}{2}\right) - 1 \right] = 14,51 \text{ m}$$

$$G_{20} = \frac{1145,92}{R} = \frac{1145,92}{171,98} = 6,6631' \approx 400'$$

$$d = \frac{G_{20}}{2} = \frac{400'}{2} = 200' = 3^\circ 20'$$

$$dm = \frac{G_{20}}{40} = \frac{400'}{40} = 10'$$

$$E(PC) = E(PI) - [T] = (180 + 4,12) - (3 + 12,12) = 176 + 12,00$$

$$E(PT) = E(PC) + [D] = (176 + 12,00) + (6 + 16,55) = 183 + 8,55$$

Para o cálculo do afastamento  $E$ , pode-se usar também a equação abaixo:

$$E = T \cdot \tan\left(\frac{\Delta}{4}\right) = 72,12 \cdot \tan\left(\frac{45,5^\circ}{4}\right) = 14,51 \text{ m}$$

### LOCAÇÃO DE CURVAS CIRCULARES POR DEFLEXÃO

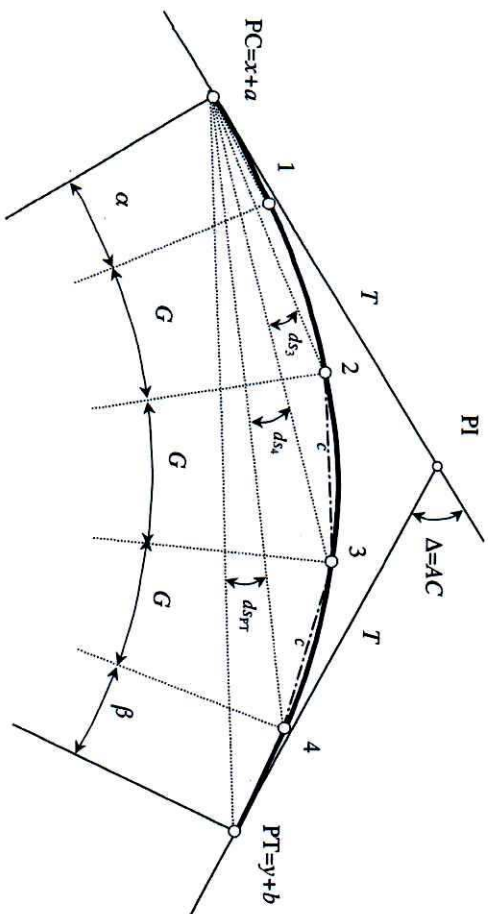


FIGURA 4.2a – Locação de curvas circulares por ângulos de deflexão.

#### 1) Deflexões sucessivas

A deflexão sucessiva é aquela correspondente a cada estaca isoladamente, ou seja, é o ângulo que a visada a cada estaca forma com a tangente ou com a visada da estaca anterior. A primeira deflexão sucessiva ( $ds_1$ ) é obtida pelo produto da deflexão por metro ( $dm$ ) pela distância entre o PC e a primeira estaca inteira dentro da curva ( $20-a$ ), de acordo com a expressão abaixo:

$$ds_1 = (20 - a) \cdot \frac{G}{2c} \tag{4.13}$$

De modo análogo, a última deflexão sucessiva ( $ds_{PT}$ ) é calculada multiplicando a deflexão por metro pela distância entre o PT e a última estaca inteira dentro da curva:

$$ds_{PT} = b \cdot \frac{G}{2c} \tag{4.14}$$

As demais deflexões são calculadas pela expressão :

$$ds = d = \frac{G}{2} \tag{4.15}$$

**2) Deflexões acumuladas**

Estas são referidas sempre em relação à tangente e apresentam valores acumulados das deflexões sucessivas. Admitindo-se que os pontos PC e PT são estacas fracionárias (caso mais comum), temos para as deflexões acumuladas os seguintes valores:

$$da_1 = ds_1 = (20 - a) \cdot \frac{G}{2c}$$

$$da_2 = ds_1 + ds_2 = (20 - a) \cdot \frac{G}{2c} + \frac{G}{2}$$

$$da_3 = ds_1 + ds_2 + ds_3 = (20 - a) \cdot \frac{G}{2c} + \frac{G}{2} + \frac{G}{2}$$

⋮

$$da_{n-1} = ds_1 + ds_2 + \dots + ds_{n-1} = (20 - a) \cdot \frac{G}{2c} + \frac{G}{2} + \dots + \frac{G}{2} = (20 - a) \cdot \frac{G}{2c} + (n - 2) \cdot \frac{G}{2}$$

$$da_n = da_{PT} = (20 - a) \cdot \frac{G}{2c} + (n - 2) \cdot \frac{G}{2} + b \cdot \frac{G}{2c}$$

Para concluir, é organizada a caderneta de locação da curva, de acordo com a tabela 4.1. Para verificação dos cálculos, a deflexão acumulada para o PT deverá ser igual à metade do ângulo central da curva.

TABELA 4.1 – Locação de curvas circulares simples.

| ESTACAS  | DEFLEXÕES SUCESSIVAS | DEFLEXÕES ACUMULADAS   |
|----------|----------------------|------------------------|
| PC = x+a | 0°                   | 0°                     |
| 1        | ds <sub>1</sub>      | da <sub>1</sub>        |
| 2        | ds <sub>2</sub>      | da <sub>2</sub>        |
| 3        | ds <sub>3</sub>      | da <sub>3</sub>        |
| ⋮        | ⋮                    | ⋮                      |
| PT = y+b | ds <sub>PT</sub>     | da <sub>PT</sub> = Δ/2 |

**EXEMPLO 3.** Construir a tabela de locação da curva do exemplo 2 (extraído do livro *ESTRADAS DE RODAGEM - PROJETO*, do professor *Wlastermilner de Senço*).

**Solução:**

Temos:  $E(PC) = 176 + 12,00$  ( $a = 12,00$ )

$E(PT) = 183 + 8,55$  ( $b = 8,55$ )

Cálculo da primeira deflexão ( $ds_1$ ):

$$ds_1 = (20 - a) \cdot \frac{G}{2c} = (20 - 12) \cdot \frac{400'}{40} = 80' = 1^\circ 20'$$

Cálculo da última deflexão ( $ds_{pr}$ ):

$$ds_{pr} = b \cdot \frac{G_{20}}{40} = 8,55 \cdot \frac{400'}{40} = 85,5' = 1^{\circ}25'$$

Cálculo das deflexões intermediárias:

$$ds = \frac{G_{20}}{2} = \frac{400'}{2} = 200' = 3^{\circ}20'$$

TABELA DE LOCAÇÃO

| ESTACAS        | DEFLEXÕES SUCESSIVAS | DEFLEXÕES ACUMULADAS |
|----------------|----------------------|----------------------|
| 176+12,00 (PC) | 0°                   | 0°                   |
| 177            | 1° 20'               | 1° 20'               |
| 178            | 3° 20'               | 4° 40'               |
| 179            | 3° 20'               | 8° 00'               |
| 180            | 3° 20'               | 11° 20'              |
| 181            | 3° 20'               | 14° 40'              |
| 182            | 3° 20'               | 18° 00'              |
| 183            | 3° 20'               | 21° 20'              |
| 183+8,55 (PT)  | 1° 25'               | 22° 45' = $\Delta/2$ |

## LOCAÇÃO DE CURVAS CIRCULARES POR OFFSETS

Para a locação de uma curva circular por *offsets*, deve-se calcular os valores da perpendicular  $\overline{NP} = y$ , quando  $\overline{AN} = x$  e o raio  $R$  da curva são conhecidos (figura 4.2b). Do triângulo ODP da figura 4.2b, temos:

$$\overline{OD} = \sqrt{R^2 - x^2} \quad \text{e} \quad \overline{AD} = y = R - \overline{OD}$$

Logo:

$$y = R - \sqrt{R^2 - x^2} \quad \therefore$$

$$y = R \cdot \left[ 1 - \sqrt{1 - \left(\frac{x}{R}\right)^2} \right]$$

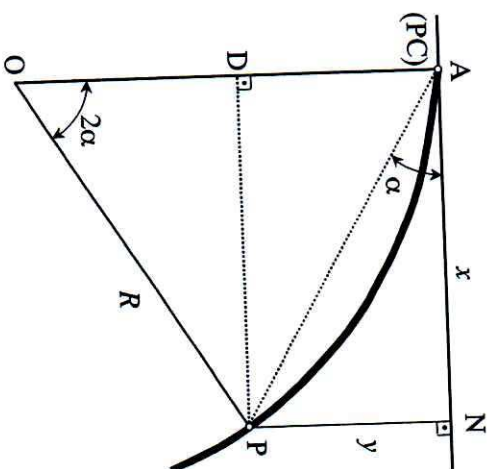
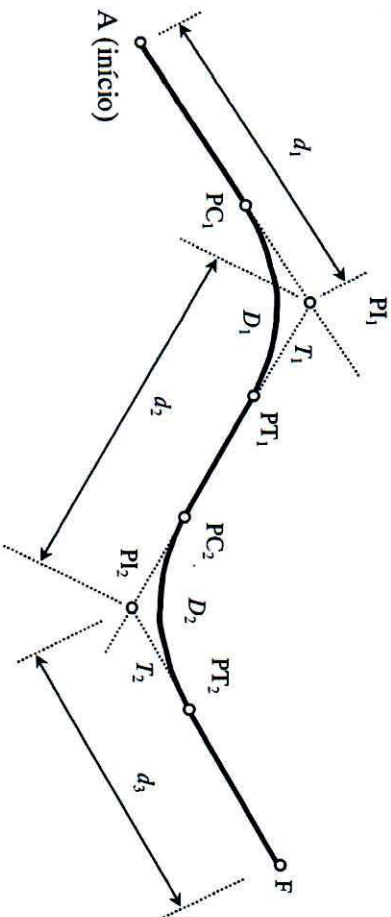


FIGURA 4.2b - Locação de curvas circulares por offsets.

**EXEMPLO 4:** Dada a figura abaixo, deduzir as expressões para cálculo das estacas dos pontos notáveis das curvas e a estaca final do traçado.



**Solução:**

$$E(PI_1) = E(A) + [d_1]$$

$$E(PC_1) = E(PI_1) - [T_1]$$

$$E(PT_1) = E(PC_1) + [D_1]$$

$$E(PI_2) = E(PT_1) + [d_2] - [T_1]$$

$$E(PC_2) = E(PI_2) - [T_2]$$

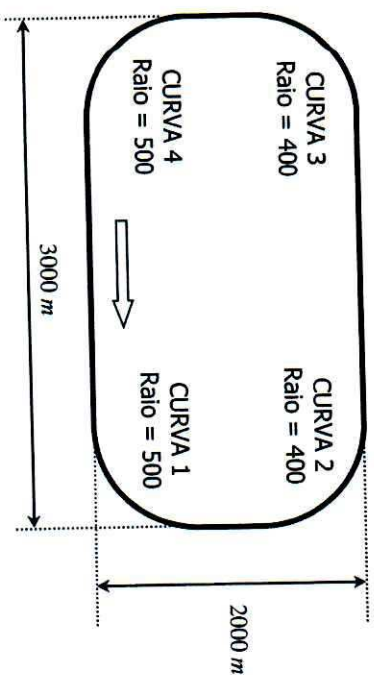
$$E(PT_2) = E(PC_2) + [D_2]$$

$$E(F) = E(PT_2) + [d_3] - [T_2]$$

Generalizando:

$$E(PI_{n+1}) = E(PT_n) + [d_{n+1}] - [T_n]$$

**EXEMPLO 5:** Calcular o comprimento do circuito abaixo:



**Solução:**

Tangentes externas:

$$T_1 = T_4 = 500 \cdot \tan\left(\frac{90^\circ}{2}\right) = 500 \text{ m}$$

$$T_2 = T_3 = 400 \cdot \tan\left(\frac{90^\circ}{2}\right) = 400 \text{ m}$$

Desenvolvimentos das curvas:

$$D_1 = D_4 = \frac{\pi \cdot 500 \cdot 90^\circ}{180^\circ} = 785,40 \text{ m}$$

$$D_2 = D_3 = \frac{\pi \cdot 400 \cdot 90^\circ}{180^\circ} = 628,32 \text{ m}$$

Comprimento do circuito:

$$C = 3000 + 3000 + 2000 + 2000 - 2 \cdot (T_1 + T_2 + T_3 + T_4) + D_1 + D_2 + D_3 + D_4$$

$$C = 10000 - 2 \cdot (1800) + 2827,44 = 9227,44 \text{ m}$$



## 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 força centrífuga. Esta força é compensada pela componente do peso do veículo devido à superelevação da curva e pelo atrito lateral entre os pneus e a superfície do pavimento, como mostra a figura 4.3. Para simplificação do raciocínio, suporemos as forças aplicadas no centro de gravidade do veículo.

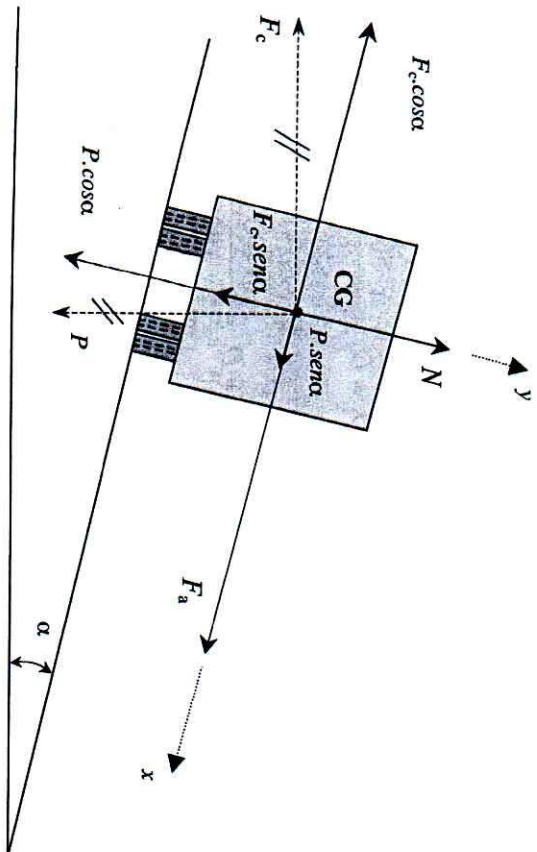


FIGURA 4.3 – Forças atuantes num veículo em curva.

De acordo com o esquema de forças da figura 4.3, temos:

$$F_c \cdot \cos \alpha = P \cdot \sin \alpha + F_a \quad (4.16)$$

$$\frac{m \cdot v^2}{R} \cdot \cos \alpha = P \cdot \sin \alpha + f \cdot N \quad (4.17)$$

$$\frac{m \cdot v^2}{R} \cdot \cos \alpha = m \cdot g \cdot \sin \alpha + f \cdot (P \cdot \cos \alpha + F_c \cdot \sin \alpha) \quad (4.18)$$

Como o ângulo  $\alpha$  é pequeno, podemos considerar, sem erro apreciável do ponto de vista prático,  $\sin \alpha \approx \tan \alpha$  e  $\cos \alpha \approx 1$ . Logo, a equação 4.18 fica:

$$\frac{v^2 \cdot (1 - f \cdot \tan \alpha)}{g \cdot R} = \tan \alpha + f \quad (4.19)$$

Nos casos normais de rodovias rurais, o coeficiente de atrito  $f$  e o valor  $e = \tan \alpha$  (superelevação) são pequenos, de modo que o produto  $f \cdot \tan \alpha$  se aproxima de zero. Considerando  $f \cdot \tan \alpha = 0$ , a equação 4.19 se reduz a:

$$R = \frac{v^2}{g \cdot (e + f)} \quad (4.20)$$

Nas unidades usuais, ou seja,  $R$  em metros,  $V$  em  $km/h$  e  $g = 9,8 \text{ m/s}^2$ , temos:

$$R = \frac{(V/3,6)^2}{9,8 \cdot (e + f)} \quad (4.21)$$

$$R = \frac{V^2}{127 \cdot (e + f)} \quad (4.22)$$

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 de atrito transversal, pode-se calcular o valor do raio mínimo admissível, para uma dada velocidade. A expressão para cálculo de  $R_{\min}$  é a seguinte:

$$R_{\min} = \frac{V^2}{127 \cdot (e_{\max} + f_{\max})} \quad (4.23)$$

Entretanto, na medida do possível, recomenda-se a utilização de raios superiores aos mínimos, cuja adoção só é justificável em condições especiais. Os símbolos empregados na dedução das fórmulas têm o seguinte significado:

$R$  = raio de curvatura horizontal, em  $m$ .

$V$  = velocidade diretriz, em  $km/h$ .

$v$  = velocidade diretriz, em  $m/s$ .

$P$  = peso do veículo.

$m$  = massa do veículo.

$g$  = aceleração da gravidade, em  $m/s^2$ .

$\alpha$  = ângulo que mede a declividade transversal da pista.

$F_a$  = força de atrito transversal.

$F_c$  = força centrífuga.

$N$  = reação normal à superfície do pavimento, devido ao peso do veículo.

$f$  = coeficiente de atrito transversal pneu/pavimento.

$e$  = superelevação, em  $m/m$ .

$R_{\min}$  = raio mínimo de curvatura horizontal, em  $m$ .

$e_{\max}$  = máxima taxa de superelevação admissível adotada, em  $m/m$ .

$f_{\max}$  = máximo coeficiente de atrito transversal pneu/pavimento.

Quando um veículo percorre uma curva horizontal circular, 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 4.2.

TABELA 4.2 – Valores máximos admissíveis para os coeficientes de atrito transversal  $f$ .

|            |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $V$ (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 |

Fonte: DNER

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

$$f_T = 0,19 - \frac{V}{1600}$$

Quanto à 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 admissíveis 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.

Os valores máximos adotados para a superelevação, segundo a AASHTO, são determinados em função dos seguintes fatores: condições climáticas, condições topográficas, tipo de área (rural ou urbana) e frequência de tráfego lento no trecho considerado. Valores muito altos para a superelevação podem provocar o tombamento de veículos lentos com centro de gravidade elevado. A tabela 4.3 resume os valores de  $e_{\max}$ . Cada projeto deverá ser especificamente analisado, antes de ser escolhido o valor final a adotar.

**EXEMPLO 6:** Calcular o raio mínimo de uma curva, dados  $V = 80$  km/h,

$$f_{\max} = 0,14 \text{ e } e_{\max} = 10\%.$$

**Solução:**

$$R_{\min} = \frac{V^2}{127 \cdot (e_{\max} + f_{\max})} = \frac{80^2}{127 \cdot (0,10 + 0,14)} \cong 210 \text{ m}$$

TABELA 4.3 – Taxas máximas de superelevação admissíveis,  $e_{max}$ .

| $e_{max}$ | CASOS DE EMPREGO   |
|-----------|--|
| 12%       | Máximo absoluto em circunstâncias 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.  |

Fonte: DNER

## VISIBILIDADE NAS CURVAS HORIZONTAIS

Todas as curvas horizontais de um traçado devem necessariamente atender às condições mínimas de visibilidade, isto é, assegurar uma distância de visibilidade não inferior à distância de visibilidade de parada.

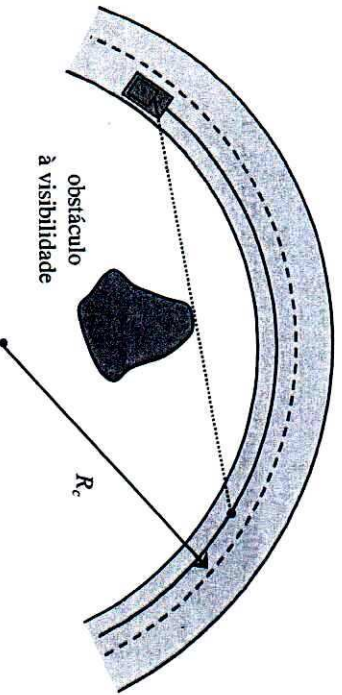


FIGURA 4.4 – Curva horizontal em aterro.

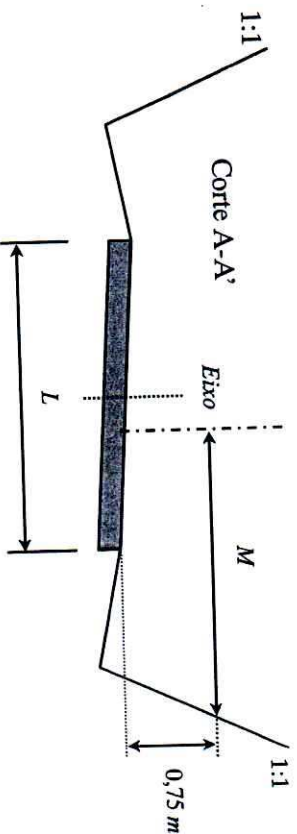
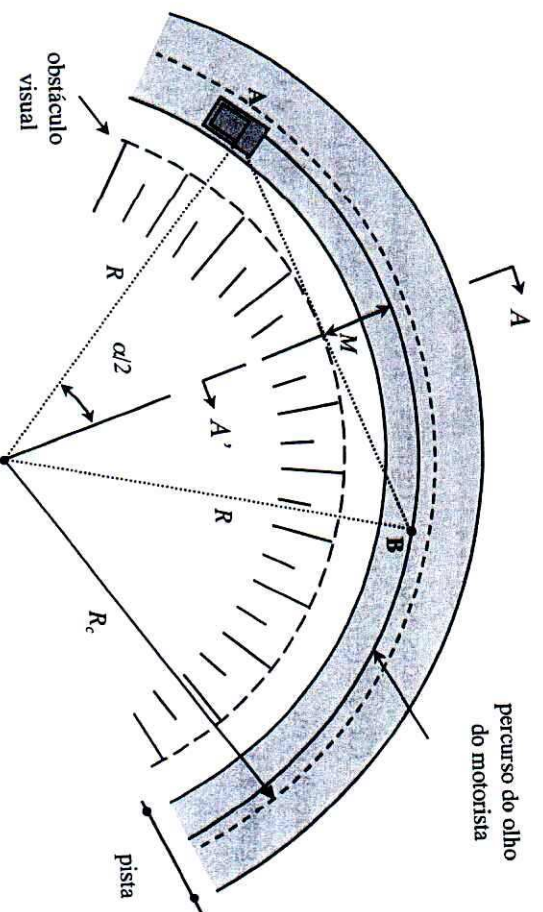


FIGURA 4.5 – Curva horizontal em corte.

Obstruções na parte interior das curvas horizontais, devido à presença de taludes de corte, muros, árvores, etc., limitam a visibilidade e podem requerer o ajuste da seção da estrada ou a modificação do alinhamento.

Em todas as curvas a visibilidade deverá ser verificada em função dos obstáculos existentes (figura 4.4) ou, no caso de curvas dentro de cortes, em função dos taludes adotados (figura 4.5). Se a condição de visibilidade mínima não for satisfeita, é necessário aumentar o raio adotado para a curva nesse trecho, ou então alargar ou abrandar os taludes do corte a fim de assegurar a distância lateral mínima necessária.

Da figura 4.5, temos:

$$\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \frac{R-M}{R} \quad \therefore \quad M = R \cdot \left[1 - \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)\right] \quad (4.24)$$

Na condição limite, o comprimento do arco AB é igual à distância de visibilidade ( $D$ ). Da geometria, temos:

$$\alpha(\text{radianos}) = \frac{\text{arco}(AB)}{R} = \frac{D}{R} \quad (4.25)$$

Substituindo o valor de  $\alpha$  (em radianos) na equação 4.24, obtém-se:

$$M = R \cdot \left[1 - \cos\left(\frac{D}{2 \cdot R}\right)\right] \quad (4.26)$$

ou, para  $\alpha$  em graus:

$$M = R \cdot \left[1 - \cos\left(\frac{28,65^\circ \cdot D}{R}\right)\right] \quad (4.27)$$

Desenvolvendo a expressão  $\cos(D/2R)$  em série de potências, temos:

$$\cos\left(\frac{D}{2R}\right) = 1 - \frac{(D/2R)^2}{2!} + \frac{(D/2R)^4}{4!} - \frac{(D/2R)^6}{6!} + \dots \approx 1 - \frac{(D/2R)^2}{2!}$$

Logo, a equação 4.26 pode ser escrita da seguinte maneira:

$$M = R \cdot \left[1 - \cos\left(\frac{D}{2 \cdot R}\right)\right] = R \cdot \left[1 - 1 + \left(\frac{D^2}{8 \cdot R^2}\right)\right]$$

$$M = \frac{D^2}{8 \cdot R} \quad (4.28)$$

onde:

$R$  = raio, em  $m$ .

$D$  = distância de visibilidade de parada ou de ultrapassagem, em  $m$ .

$M$  = afastamento horizontal mínimo, em  $m$ .

Para efeito de cálculo, podemos considerar  $R \approx R_c$ , sem erro apreciável do ponto de vista prático.

**EXEMPLO 7:** Uma curva circular de uma estrada tem raio  $R = 600 \text{ m}$ .

Calcular o menor valor de  $M$ , de modo que seja satisfeita a condição mínima de visibilidade de parada. Dados: Velocidade de projeto  $V = 100 \text{ km/h}$  e coeficiente de atrito longitudinal pneu/pavimento ( $f$ ) igual a 0,28 (vide tabela 3.3).

**Solução:** Cálculo da distância de visibilidade de parada:

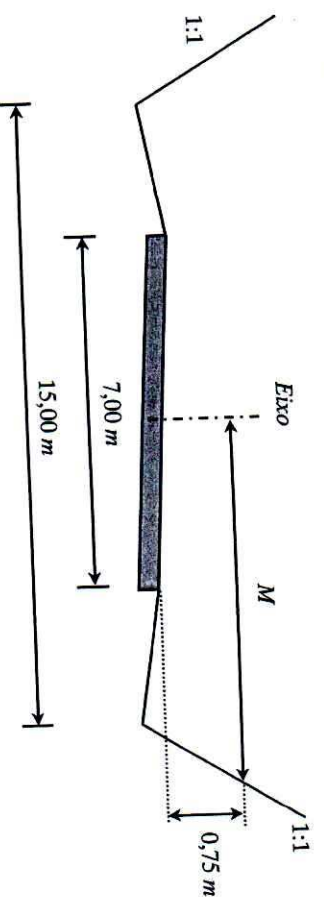
$$D_p = 0,7 \cdot V + \frac{V^2}{255 \cdot f} = 0,7 \cdot (100) + \frac{100^2}{255 \cdot (0,28)} \approx 210 \text{ m}$$

Cálculo de  $M$ :  $M = (600) \cdot \left[ 1 - \cos \left( 28,65^\circ \cdot \frac{210}{600} \right) \right] = 9,2 \text{ m}$  ou:

$$M = \frac{D_p^2}{8 \cdot R} = \frac{210^2}{8 \cdot (600)} = 9,2 \text{ m}$$

**EXEMPLO 8:** Uma estrada foi projetada com velocidade de projeto

$V_p = 90 \text{ km/h}$  ( $e_{\max} = 12\%$ ). Uma curva circular de raio  $R_c = 450 \text{ m}$  está em um corte com declividade longitudinal  $i = 1\%$  e seção transversal dada na figura. Verificar o valor do raio da curva quanto à estabilidade (ou seja, verificar se  $R \geq R_{\min}$ ). Verificar também se a condição mínima de visibilidade de parada é satisfeita. Considerar: linha do percurso do olho do motorista = eixo da pista (adaptado das notas de aula do professor Carlos Reynaldo Toledo Pimenta).



**Solução:** Verificação do raio quanto à estabilidade.

(tabela 4.2  $\rightarrow f_r = f_{\max} = 0,14$ ):

$$R_{\min} = \frac{V^2}{127 \cdot (e_{\max} + f_r)} = \frac{90^2}{127 \cdot (0,12 + 0,14)} = 245,31 \text{ m}$$

$$R = 450 \text{ m} > R_{\min} \text{ (OK)}$$

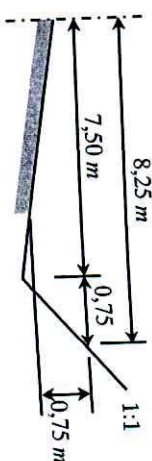
Verificação do raio quanto à visibilidade.

(tabela 3.3  $\rightarrow f_L = 0,29$ ):

$$D_p = 0,7 \cdot V + \frac{V^2}{255 \cdot (f_L + i)} = 0,7 \cdot (90) + \frac{90^2}{255 \cdot (0,29 + 0,01)} = 168,88 \text{ m}$$

$$M = \frac{D_p^2}{8 \cdot R_c} = \frac{168,88^2}{8 \cdot (450)} = 7,9 \text{ m}$$

$$M_{\text{disponível}} = 8,25 \text{ m} > 7,9 \text{ (OK)}$$



**CURVAS CIRCULARES COMPOSTAS**

Duas curvas circulares consecutivas de raios diferentes com um ponto em comum, constituem uma *curva composta* quando estão do mesmo lado da reta tangente neste ponto, chamado PCC (ponto de curvatura composta).

**CURVA COMPOSTA COM 2 CENTROS**

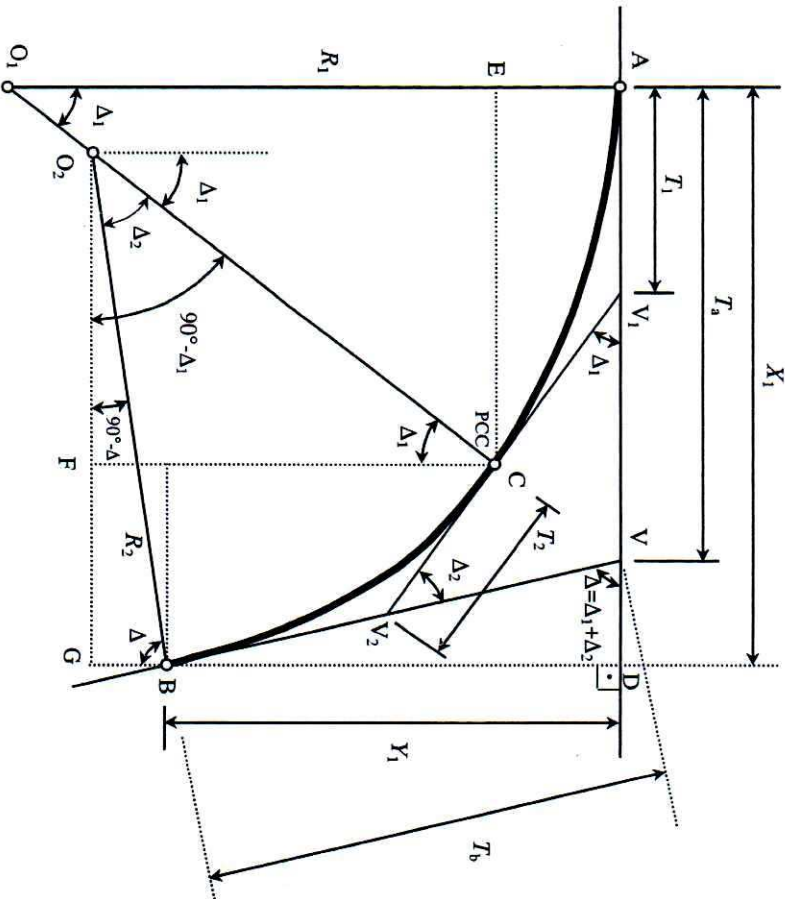


FIGURA 4.6 – Curva composta com 2 centros.

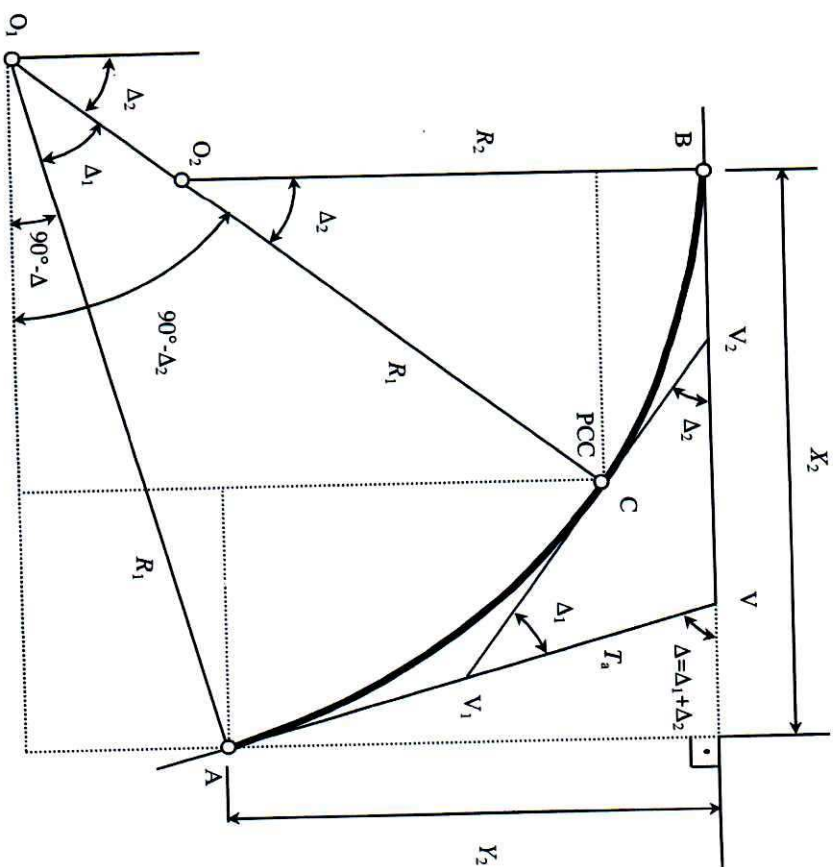


FIGURA 4.7 – Curva composta com 2 centros (inverso da figura 4.6).

As curvas circulares compostas são utilizadas preferencialmente em terrenos montanhosos onde duas, três ou mais curvas simples de raios diferentes são necessárias para adequar o traçado da estrada à topografia.

Com relação à figura 4.6, temos:

$$X_1 = \overline{EC} + \overline{O_2G} - \overline{O_2F}$$

$$X_1 = R_1 \cdot \text{sen } \Delta_1 + R_2 \cdot \text{sen } \Delta - R_2 \cdot \text{sen } \Delta_1$$

$$X_1 = R_2 \cdot \text{sen } \Delta + (R_1 - R_2) \cdot \text{sen } \Delta_1 \quad (4.29)$$

$$Y_1 = R_1 - \overline{EO_1} + \overline{CF} - \overline{BG}$$

$$Y_1 = R_1 \cdot (1 - \cos \Delta_1) + R_2 \cdot \cos \Delta_1 - R_2 \cdot \cos \Delta$$

$$Y_1 = R_1 - R_2 \cdot \cos \Delta - (R_1 - R_2) \cdot \cos \Delta_1 \quad (4.30)$$

Nas equações anteriores,  $X_1$  e  $Y_1$  são as coordenadas do ponto B, com referência ao ponto A como origem e  $\overline{AV}$  como eixo x. Sendo  $T_a = \overline{AV}$  (tangente longa) e  $T_b = \overline{VB}$  (tangente curta), temos:

$$T_b = \frac{Y_1}{\text{sen } \Delta}$$

$$T_b = \frac{R_1 - R_2 \cdot \cos \Delta - (R_1 - R_2) \cdot \cos \Delta_1}{\text{sen } \Delta} \quad (4.31)$$

Da figura 4.7, temos:

$$X_2 = R_2 \cdot \text{sen } \Delta_2 + R_1 \cdot \text{sen } \Delta - R_1 \cdot \text{sen } \Delta_2$$

$$X_2 = R_1 \cdot \text{sen } \Delta - (R_1 - R_2) \cdot \text{sen } \Delta_2 \quad (4.32)$$

$$Y_2 = R_2 \cdot (1 - \cos \Delta_2) + R_1 \cdot \cos \Delta_2 - R_1 \cdot \cos \Delta$$

$$Y_2 = R_2 - R_1 \cdot \cos \Delta + (R_1 - R_2) \cdot \cos \Delta_2 \quad (4.33)$$

onde  $X_2$  e  $Y_2$  são as coordenadas do ponto A, com referência ao ponto B como origem e  $\overline{BV}$  como eixo x. Também temos:

$$T_a = \frac{Y_2}{\text{sen } \Delta}$$

$$T_a = \frac{R_2 - R_1 \cdot \cos \Delta + (R_1 - R_2) \cdot \cos \Delta_2}{\text{sen } \Delta} \quad (4.34)$$

Da equação 4.31, temos:

$$1 - \cos \Delta_1 = \frac{T_b \cdot \text{sen } \Delta - R_2 \cdot (1 - \cos \Delta)}{(R_1 - R_2)} \quad (4.35)$$

Da equação 4.34, temos:



$$1 - \cos \Delta_2 = \frac{R_1 \cdot (1 - \cos \Delta) - T_a \cdot \operatorname{sen} \Delta}{(R_1 - R_2)} \quad (4.36)$$

Da equação 4.29, temos:

$$\operatorname{sen} \Delta_1 = \frac{X_1 - R_2 \cdot \operatorname{sen} \Delta}{R_1 - R_2} = \frac{T_a + T_b \cdot \cos \Delta - R_2 \cdot \operatorname{sen} \Delta}{R_1 - R_2} \quad (4.37)$$

Da equação 4.32, temos:

$$\operatorname{sen} \Delta_2 = \frac{R_1 \cdot \operatorname{sen} \Delta - X_2}{R_1 - R_2} = \frac{R_1 \cdot \operatorname{sen} \Delta - T_a \cdot \cos \Delta - T_b}{R_1 - R_2} \quad (4.38)$$

Dividindo membro a membro a equação 4.35 pela equação 4.37, e levando em consideração que  $(1 - \cos \Delta_1) / \operatorname{sen} \Delta_1 = \tan(\Delta_1/2)$ , temos:

$$\tan\left(\frac{\Delta_1}{2}\right) = \frac{T_b \cdot \operatorname{sen} \Delta - R_2 \cdot (1 - \cos \Delta)}{T_a + T_b \cdot \cos \Delta - R_2 \cdot \operatorname{sen} \Delta} \quad (4.39)$$

De forma análoga, dividindo a equação 4.36 pela equação 4.38, temos:

$$\tan\left(\frac{\Delta_2}{2}\right) = \frac{R_1 \cdot (1 - \cos \Delta) - T_a \cdot \operatorname{sen} \Delta}{R_1 \cdot \operatorname{sen} \Delta - T_b - T_a \cdot \cos \Delta} \quad (4.40)$$

Da equação 4.30, temos:

$$R_1 = R_2 + \frac{Y - R_2 \cdot (1 - \cos \Delta)}{1 - \cos \Delta_1}$$

$$R_1 = R_2 + \frac{T_b \cdot \operatorname{sen} \Delta - R_2 \cdot (1 - \cos \Delta)}{1 - \cos \Delta_1} \quad (4.41)$$

Da equação 4.33, temos:

$$R_2 = R_1 - \frac{R_1 \cdot (1 - \cos \Delta) - T_a \cdot \operatorname{sen} \Delta}{1 - \cos \Delta_2} \quad (4.42)$$

Como podemos observar, numa curva composta com dois raios, temos sete elementos principais:

$$R_1, R_2, T_a, T_b, \Delta, \Delta_1 \text{ e } \Delta_2.$$

Quando 4 desses elementos são conhecidos, incluindo um ângulo, os outros podem ser determinados.

A tabela a seguir resume os passos necessários para a solução de problemas envolvendo curva composta com dois centros.

TABELA 4.4 – Problemas típicos de curvas compostas com 2 centros.

| CASO | DADOS                                     | PEDE-SE                                  | SEQÜÊNCIA DE CÁLCULO  |
|------|---|--|---|
| 1    | $R_1, R_2, \Delta_1, \Delta_2$            | $\Delta, T_a, T_b$                       | $\Delta = \Delta_1 + \Delta_2$ , Usar (4.34) para $T_a$ , (4.31) para $T_b$   |
| 2    | $R_1$ (ou $R_2$ ),<br>$T_a, T_b, \Delta$  | $\Delta_1, \Delta_2, R_2$<br>(ou $R_1$ ) | Usar (4.40) para $\Delta_2$ , (4.42) para $R_2$ , $\Delta_1 = \Delta - \Delta_2$<br>Dado $T_b$ , usar (4.39) para $\Delta_1$ , (4.41) para $R_1$ , $\Delta_2 = \Delta - \Delta_1$ |
| 3    | $R_1, R_2, \Delta$ ,<br>$T_a$ (ou $T_b$ ) | $\Delta_1, \Delta_2, T_b$<br>(ou $T_a$ ) | Usar (4.36) para $\Delta_2$ , (4.31) para $T_b$ , $\Delta_1 = \Delta - \Delta_2$<br>Dado $T_b$ , usar (4.35) para $\Delta_1$ , (4.34) para $T_a$ , $\Delta_2 = \Delta - \Delta_1$ |
| 4    | $R_1, T_a, \Delta_1$                      | $R_2, T_b, \Delta_2$                     | $\Delta_2 = \Delta - \Delta_1$ , usar (4.42) para $R_2$ , (4.31) para $T_b$   |
| 5    | $R_2, T_b, \Delta_2$                      | $R_1, T_a, \Delta_1$                     | $\Delta_1 = \Delta - \Delta_2$ , usar (4.41) para $R_1$ , (4.34) para $T_a$   |
| 6    | $R_1, AB$ ,<br>ângulos VAB<br>e VBA       | $R_2, T_a$ ,<br>$T_b, \Delta_2$          | $\Delta = VAB + VBA$ , resolver triângulo AVB para $T_a$ e $T_b$ ,<br>usar (4.40) para $\Delta_2$ , (4.42) para $R_2$ , $\Delta_1 = \Delta - \Delta_2$                            |
| 7    | $R_2, AB$ ,<br>ângulos VAB<br>e VBA       | $R_1, T_a$ ,<br>$T_b, \Delta_1$          | $\Delta = VAB + VBA$ , resolver triângulo AVB para $T_a$ e $T_b$ ,<br>usar (4.39) para $\Delta_1$ , (4.41) para $R_1$ , $\Delta_2 = \Delta - \Delta_1$                            |

CURVA COMPOSTA COM 3 CENTROS

Na figura 4.8a, temos uma curva composta com centros  $O_1, O_2$  e  $O_3$ , e ângulos centrais  $\Delta_1, \Delta_2$  e  $\Delta_3$ , onde  $\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3$  e  $T_a = \overline{AV}$  (tangente longa) e  $T_b = \overline{VB}$  (tangente curta).

Sendo  $X_1$  e  $Y_1$  as coordenadas do ponto B com relação ao ponto A como origem e  $\overline{AV}$  como eixo x, temos:

$$Y_1 = T_b \cdot \text{sen } \Delta$$

$$T_b = \frac{Y_1}{\text{sen } \Delta}$$

$$X_1 = T_a + T_b \cdot \text{cos } \Delta$$

$$T_a = X_1 - T_b \cdot \text{cos } \Delta$$

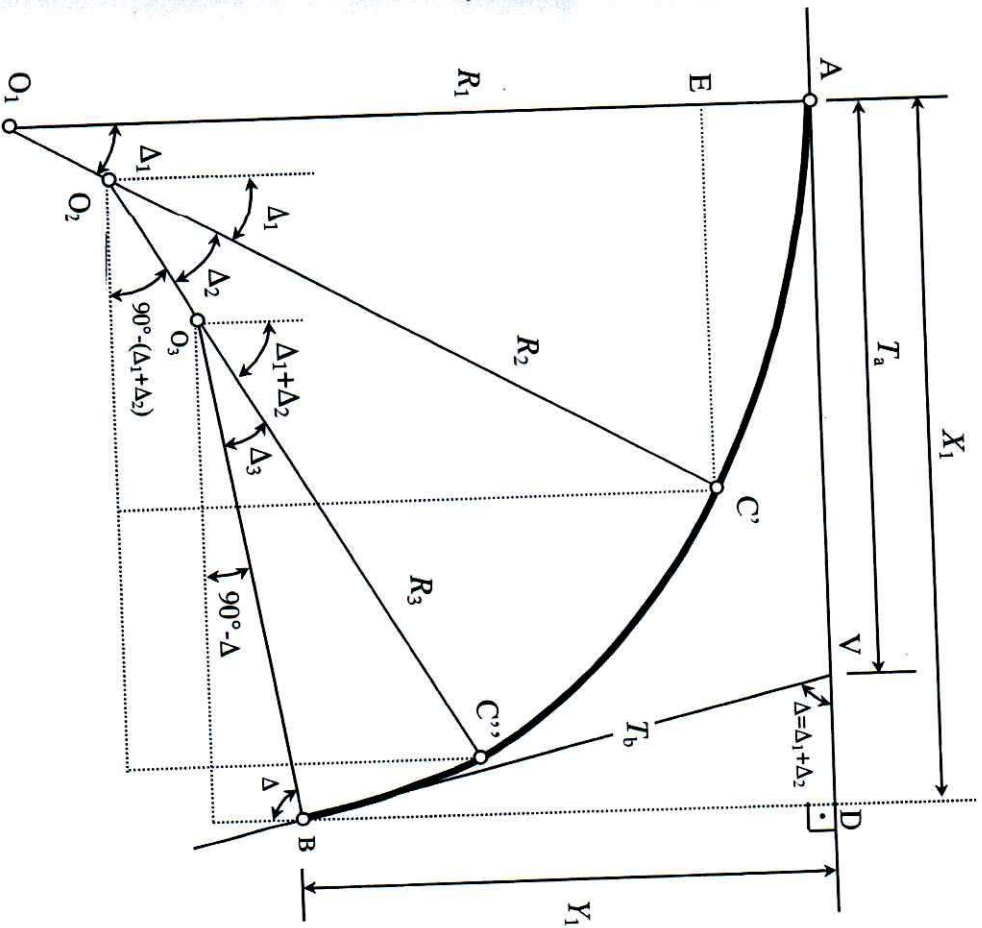


FIGURA 4.8a – Curva composta com 3 centros.

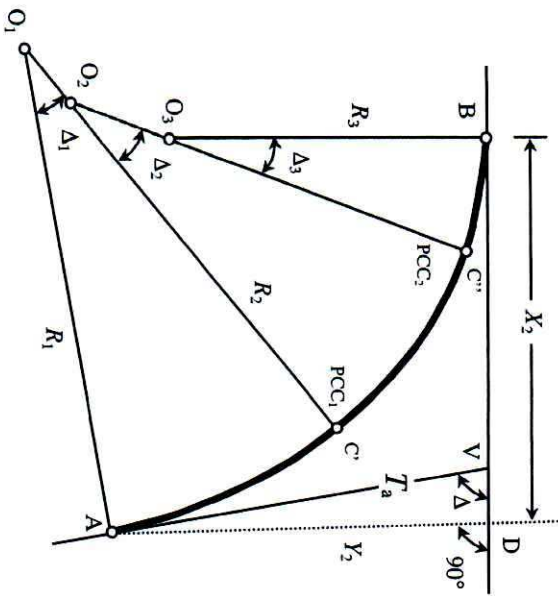


FIGURA 4.8b – Curva composta com 3 centros (inverso da figura 4.8a).

Da figura 4.8a, temos:

$$X_1 = (R_1 - R_2) \cdot \text{sen } \Delta_1 + (R_2 - R_3) \cdot \text{sen}(\Delta_1 + \Delta_2) + R_3 \cdot \text{sen } \Delta$$

$$Y_1 = R_1 - (R_1 - R_2) \cdot \text{cos } \Delta_1 - (R_2 - R_3) \cdot \text{cos}(\Delta_1 + \Delta_2) - R_3 \cdot \text{cos } \Delta$$

$$T_1 = \frac{R_1 - (R_1 - R_2) \cdot \text{cos } \Delta_1 - (R_2 - R_3) \cdot \text{cos}(\Delta_1 + \Delta_2) - R_3 \cdot \text{cos } \Delta}{\text{sen } \Delta}$$

$$T_a = X_1 \cdot \frac{R_1 - (R_1 - R_2) \cdot \text{cos } \Delta_1 - (R_2 - R_3) \cdot \text{cos}(\Delta_1 + \Delta_2) - R_3 \cdot \text{cos } \Delta}{\tan \Delta}$$

Outra expressão para cálculo de  $T_a$  é a seguinte:

$$T_a = \frac{R_3 + (R_1 - R_2) \cdot \text{cos}(\Delta_2 + \Delta_3) + (R_2 - R_3) \cdot \text{cos } \Delta_3 - R_1 \cdot \text{cos } \Delta}{\text{sen } \Delta}$$

Deixaremos a demonstração das equações anteriores como exercício.

**EXEMPLO 9:** Numa curva circular composta com 2 centros, temos:

$\Delta_2 = 20^\circ$ ,  $G_2 = 3^\circ 24'$  (grau da curva 2),  $\Delta_1 = 25^\circ$  e  $G_1 = 2^\circ$ . Calcular  $T_a$  e  $T_b$ .

Solução:

$$\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 = 25^\circ + 20^\circ = 45^\circ$$

$$R_1 = \frac{1145,92}{G_1} = \frac{1145,92}{2} = 572,96 \text{ m}$$

$$R_2 = \frac{1145,92}{G_2} = \frac{1145,92}{3,4} = 337,04 \text{ m}$$

$$T_a = \frac{337,04 - 572,96 \cdot \text{cos } 45^\circ + (572,96 - 337,04) \cdot \text{cos } 20^\circ}{\text{sen } 45^\circ} = 217,21 \text{ m}$$

$$T_b = \frac{572,96 - 337,04 \cdot \text{cos } 45^\circ - (572,96 - 337,04) \cdot \text{cos } 25^\circ}{\text{sen } 45^\circ} = 120,82 \text{ m}$$

**CURVA COMPOSTA COM 3 CENTROS (acesso-tipo DERSA/SP)**

São utilizadas principalmente em projetos-tipo de interseções, onde estas curvas permitem dar à pista uma conformação mais adaptada à trajetória das rodas dos veículos em curva. Além disso, essas curvas também podem ser utilizadas, em certos casos, como alternativa de transição.

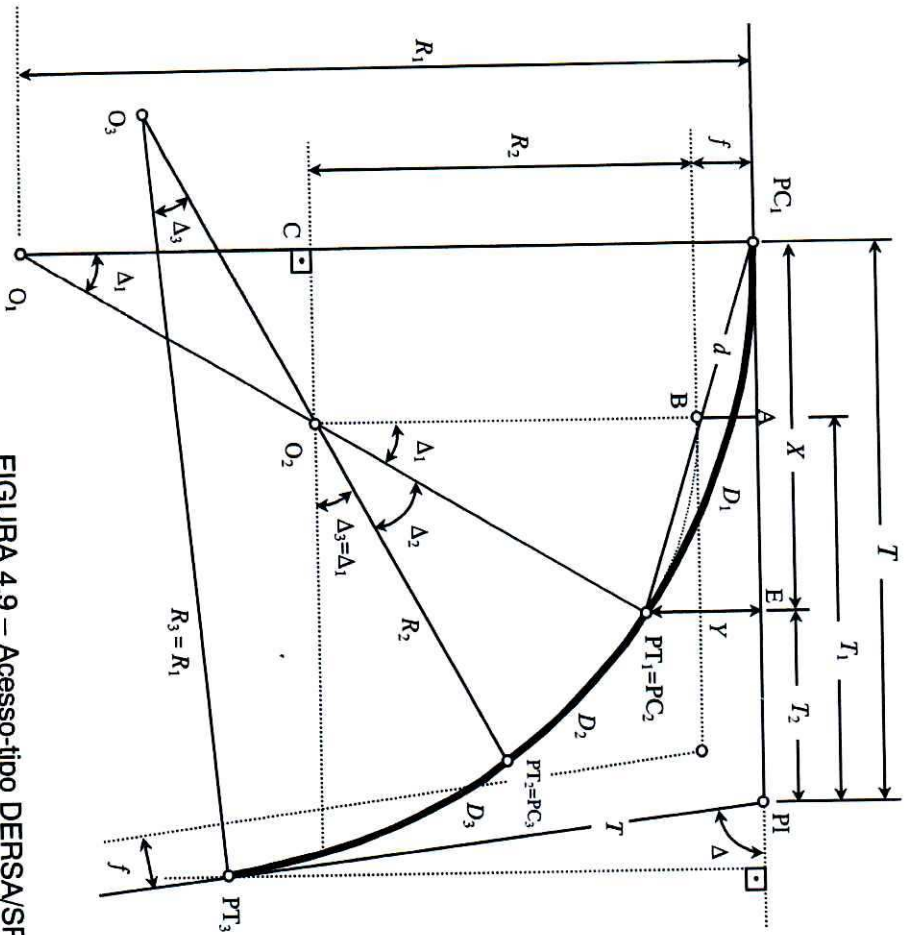


FIGURA 4.9 – Acesso-tipo DERSA/SP.

No caso mais comum da figura 4.9, os raios das curvas externas são iguais ( $R_1=R_2$ ). A tabela a seguir, apresenta as condições mínimas de projeto nas conversões de interseções.

TABELA 4.5 – Condições mínimas de projeto, para borda dos pavimentos, nas conversões de interseções.

| VEÍCULO | ÂNGULO DE CONVERSÃO | RAIO DE CURVA SIMPLES | CURVA COMPOSTA DE 3 CENTROS |         | ÂNGULO DE CONVERSÃO | CURVA COMPOSTA DE 3 CENTROS |       |
|---------|---------------------|-----------------------|-----------------------------|---------|---------------------|-----------------------------|-------|
|         |                     |                       | Raio (m)                    | f (m)   |                     | Raio (m)                    | f (m) |
| VP      | 30°                 | 18                    | -                           | -       | 105°                | 30-6-30                     | 0,8   |
| CO      |                     | 30                    | -                           | -       |                     | 30-11-30                    | 1,0   |
| O       |                     | 46                    | -                           | -       |                     | 30-11-30                    | 1,5   |
| SR      | 45°                 | 61                    | -                           | -       | 120°                | 46-12-46                    | 2,0   |
| VP      |                     | 15                    | -                           | -       |                     | 30-6-30                     | 0,6   |
| CO      |                     | 33                    | -                           | -       |                     | 30-9-30                     | 1,5   |
| O       | 36                  | -                     | -                           | 30-9-30 | 1,7                 |                             |       |
| SR      | 60°                 | 46                    | 61-30-61                    | 1,0     | 135°                | 37-11-37                    | 2,1   |
| VP      |                     | 12                    | -                           | -       |                     | 30-6-30                     | 0,5   |
| CO      |                     | 18                    | -                           | -       |                     | 30-9-30                     | 1,5   |
| O       | 30                  | -                     | -                           | 30-9-30 | 1,5                 |                             |       |
| SR      | 75°                 | -                     | 61-23-61                    | 1,1     | 150°                | 37-9-37                     | 2,4   |
| VP      |                     | 11                    | 30-8-30                     | 0,6     |                     | 23-5-23                     | 0,6   |
| CO      |                     | 17                    | 37-14-37                    | 0,6     |                     | 30-9-30                     | 1,5   |
| O       | 23                  | 37-14-37              | 1,2                         | 30-9-30 | 1,5                 |                             |       |
| SR      | 90°                 | -                     | 46-15-46                    | 1,7     | 180° (retorno)      | 37-9-37                     | 2,3   |
| VP      |                     | 9                     | 30-6-30                     | 0,8     |                     | 15-5-15                     | 1,5   |
| CO      |                     | 15                    | 37-12-37                    | 0,8     |                     | 30-9-30                     | 1,5   |
| O       | -                   | 37-12-37              | 1,5                         | 30-6-30 | 3,0                 |                             |       |
| SR      | -                   | 46-15-46              | 1,5                         | 37-8-37 | 3,3                 |                             |       |

f = Deslocamento da tangente (m)

Fonte básica : AASHTO

Conhecidos o ângulo central ( $\Delta$ ), o afastamento das tangentes ( $f$ ) e os raios das curvas ( $R_1, R_2$  e  $R_3=R_1$ ), os demais elementos ( $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3, T, T_1, T_2, d, X, Y$ ) podem ser determinados. A seqüência de cálculo é a seguinte:

### 1) Cálculo dos ângulos centrais $\Delta_1, \Delta_2$ e $\Delta_3$

Do triângulo retângulo  $CO_1O_2$  da figura 4.9, temos:

$$\cos \Delta_1 = \frac{R_1 - (R_2 + f)}{R_1 - R_2}$$

$\therefore$

$$\Delta_1 = \Delta_3 = \arccos \left( \frac{R_1 - (R_2 + f)}{R_1 - R_2} \right)$$

Logo:

$$\Delta_2 = \Delta - (\Delta_1 + \Delta_3)$$

### 2) Cálculo da tangente $T$

Da figura 4.9, temos:

$$T = T_1 + \overline{O_2C}$$

A tangente da curva de raio  $(R_2 + f)$  é dada por:

$$T_1 = (R_2 + f) \cdot \tan \left( \frac{\Delta}{2} \right)$$

Do triângulo retângulo  $CO_1O_2$ , temos:

$$\overline{O_2C} = [R_1 - (R_2 + f)] \cdot \tan \Delta_1$$

donde:

$$T = (R_2 + f) \cdot \tan \left( \frac{\Delta}{2} \right) + [R_1 - (R_2 + f)] \cdot \tan \Delta_1$$

Com os valores de  $T, T_1$  e  $f$ , determina-se a posição de  $PC_1, A$  e  $B$ .

### 3) Cálculo da corda auxiliar $d$

Aplicando a lei dos senos no triângulo  $PC_1O_1PT_1$ , temos:

$$\frac{d}{\text{sen } \Delta_1} = \frac{R_1}{\text{sen} \left( 90^\circ - \frac{\Delta_1}{2} \right)}$$

donde:

$$d = R_1 \cdot \frac{\text{sen } \Delta_1}{\cos(\Delta_1/2)}$$

**4) Cálculo das coordenadas  $X$  e  $Y$  de  $PT_1$ , em relação ao  $PC_1$** 

Do triângulo  $PC_1EPT_1$ , temos:

$$X = d \cdot \cos\left(\frac{\Delta_1}{2}\right) \quad \text{e} \quad Y = d \cdot \sin\left(\frac{\Delta_1}{2}\right)$$

Logo, temos:

$$X = R_1 \cdot \sin \Delta_1$$

$$Y = R_1 \cdot \sin(\Delta_1) \cdot \tan\left(\frac{\Delta_1}{2}\right)$$

Analisando a figura 4.9, podemos observar que o afastamento máximo das tangentes ( $f_{\max}$ ) é obtido quando o ângulo central  $\Delta_2$  é igual a zero, desaparecendo a curva intermediária. Neste caso, os pontos  $PT_1$  e  $PC_3$  coincidem, restando apenas uma curva de raio  $R_1$ . A expressão para cálculo de  $f_{\max}$  é dada abaixo.

$$f_{\max} = \left(1 - \cos\frac{\Delta}{2}\right) \cdot (R_1 - R_2)$$

Deixaremos a demonstração como exercício.

**EXERCÍCIOS**

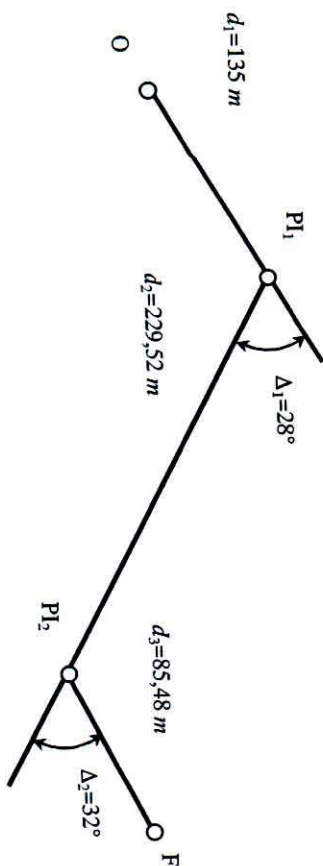
Os exercícios assinalados com (\*) foram cedidos pelo professor Carlos Reynaldo Toledo Pimenta, da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

1. Dados  $\Delta = 47^\circ 30'$  e  $G_{20} = 12^\circ$ , calcular  $T$  e  $E$ .
2. Dados  $\Delta = 40^\circ$  e  $E = 15 \text{ m}$ , calcular  $T$  e  $R$ .
3. Dados  $\Delta = 32^\circ$  e  $R = 1220 \text{ m}$ , calcular  $T$  e  $E$ .
4. Dado  $R = 150 \text{ m}$ , calcular a deflexão sobre a tangente para  $c = 20 \text{ m}$ .
5. Dados  $\Delta = 43^\circ$  e  $E = 52 \text{ m}$ , calcular o grau da curva.
6. Se  $\Delta = 30^\circ 12'$  e  $G_{20} = 2^\circ 48'$ , calcular  $T$  e  $D$ .
7. Usando os dados do problema anterior, e assumindo que  $E(PT) = 42 + 16,60$ , calcular as estacas do PC e do PT.
8. Dados  $\Delta = 22^\circ 36'$ ,  $G_{20} = 4^\circ$  e  $E(PC) = 40 + 15,00$ . Construir a tabela de locação da curva.

9. Dados  $\Delta = 47^\circ 12'$ ,  $E(\text{PI}) = 58 + 12,00$ . Calcular  $R$ ,  $T$ ,  $E$  e  $D$  para  $G_{20} = 6^\circ$ . Calcular também  $E(\text{PC})$  e  $E(\text{PT})$ .
10. Dados  $\Delta = 24^\circ 20'$  e  $R = 1500 \text{ m}$ . Localizar o PC e o PT, sabendo que a estaca do PI é  $360 + 12,45$ .
11. Dados  $\Delta = 22^\circ 36'$  e  $T = 250 \text{ m}$ , calcular  $G_{20}$  e  $D$ .
12. Calcular o desenvolvimento de uma curva circular de raio  $R = 1524$  metros e ângulo central  $\Delta = 32^\circ$ .
13. Numa curva circular com um raio de  $170 \text{ m}$ , queremos localizar um ponto logo à frente do ponto de curvatura (PC). Sabemos que o comprimento do arco é de  $20 \text{ m}$ . A soma das coordenadas sobre a tangente deste ponto são:
- (considerar  $\text{sen } 3,3703^\circ = 0,058789$  e  $\text{cos } 3,3703^\circ = 0,9983$ ):
- a)  $0,168 \text{ m}$                       b)  $0,924 \text{ m}$   
 c)  $1,848 \text{ m}$                       d)  $21,14 \text{ m}$
14. Demonstrar que:  $E = T \cdot \tan\left(\frac{\Delta}{4}\right)$
15. Dados  $\Delta = 30^\circ$ ,  $R = 680 \text{ m}$  e  $E(\text{PI}) = 205 + 2,52$ , calcular  $G$ ,  $T$ ,  $D$ ,  $E(\text{PC})$  e  $E(\text{PT})$ .

16. (\*) Numa curva horizontal circular, conhecem-se os seguintes elementos:  $G = 1^\circ$ ,  $E(\text{PC}) = 55 + 9,83$  e  $E(\text{PT}) = 81 + 9,83$ . Se alterarmos o raio dessa curva para  $2000 \text{ m}$ , qual será a estaca do novo PT?

17. (\*) Dado o traçado da figura, adotar para as curvas 1 e 2 os maiores raios possíveis.

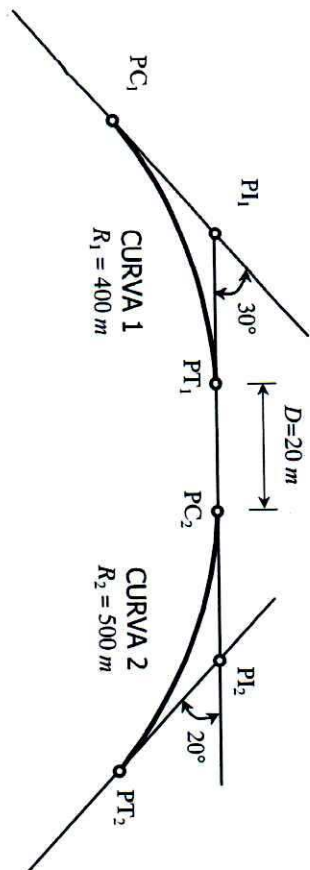


18. (\*) Com relação ao problema anterior, supondo-se que as distâncias de  $O$  a  $PI_1$  e  $PI_2$  a  $F$  sejam suficientemente grandes, escolher um valor único para o raio das duas curvas de forma que esse valor seja o maior possível.

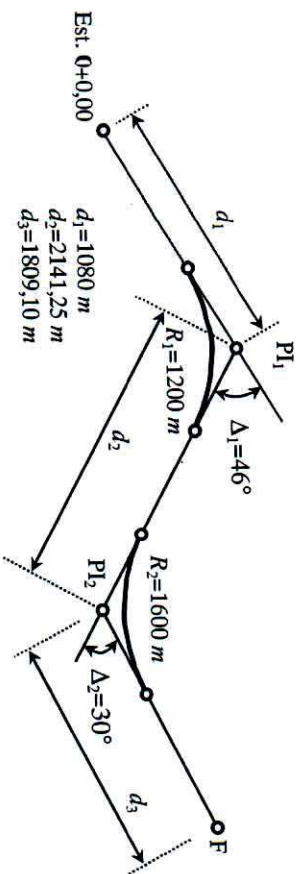
19. (\*) Num trecho de rodovia temos duas curvas circulares simples. A primeira começando na estaca  $10+0,00$  e terminando na estaca  $20+9,43$  com  $300 \text{ m}$  de raio. A segunda começando na estaca  $35+14,61$  e terminando na estaca  $75+0,00$  com  $1500 \text{ m}$  de raio. Deseja-se aumentar o raio da primeira curva para  $600 \text{ m}$  sem alterar a extensão total do trecho. Qual deverá ser o raio da segunda curva?

Dados:  $\Delta_1 = 40^\circ$  e  $\Delta_2 = 30^\circ$ .

20. (\*) A figura mostra a planta de um trecho de rodovia com duas curvas de mesmo sentido, desejando-se substituir estas duas curvas por uma curva única de raio  $R$ . Calcular o valor de  $R$  para que o PC da nova curva coincida com o  $PC_1$  do traçado antigo (início da curva 1).



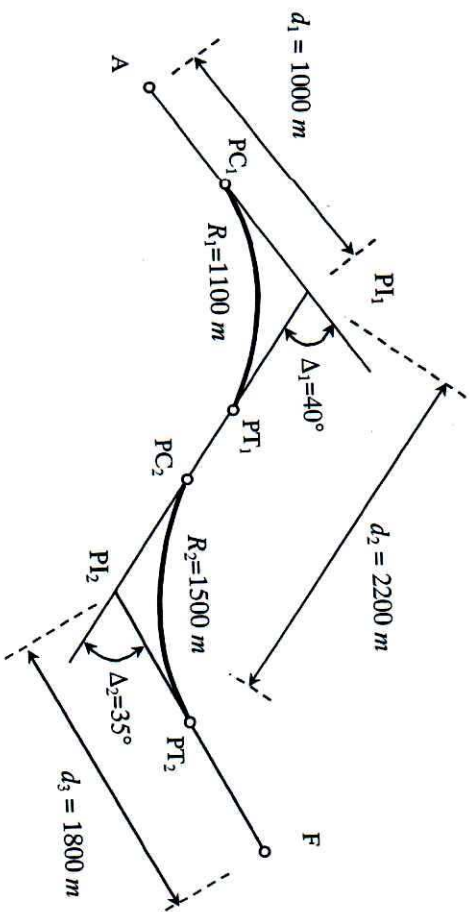
21. (\*) A figura mostra a planta de um traçado com duas curvas circulares. Calcular as estacas dos PI's e a estaca final do traçado.



22. Calcular as curvas circulares abaixo  $\{G, T, D, E, E(PC), E(PT), d, dm\}$ :
- a)  $E(PI) = 202 + 2,50$      $\Delta = 52^\circ$      $R = 650 \text{ m}$      $c = 20 \text{ m}$
  - b)  $E(PI) = 1345 + 12,73$      $\Delta = 10^\circ$      $R = 2000 \text{ m}$      $c = 20 \text{ m}$
  - c)  $E(PI) = 376 + 19,50$      $\Delta = 64^\circ 20'$      $R = 350 \text{ m}$      $c = 10 \text{ m}$
  - d)  $E(PI) = 467 + 3,75$      $\Delta = 80^\circ$      $R = 200 \text{ m}$      $c = 5 \text{ m}$

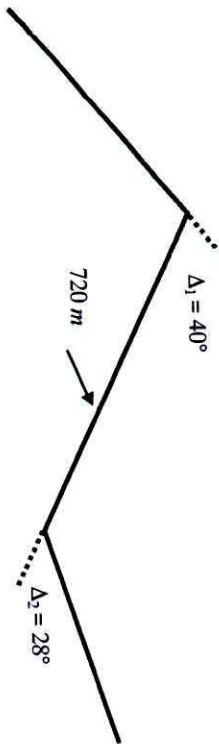
23. Repetir a questão anterior adotando para  $G$  um valor múltiplo de  $40^\circ$ . Construir as tabelas de locação das curvas ( $R > R'$ ).

24. A figura mostra a planta de um traçado com duas curvas circulares. Calcular as estacas dos pontos notáveis das curvas ( $PC$ ,  $PI$  e  $PT$ ) e a estaca inicial do traçado, sabendo que a estaca do ponto  $F$  é  $540 + 15,00$ .



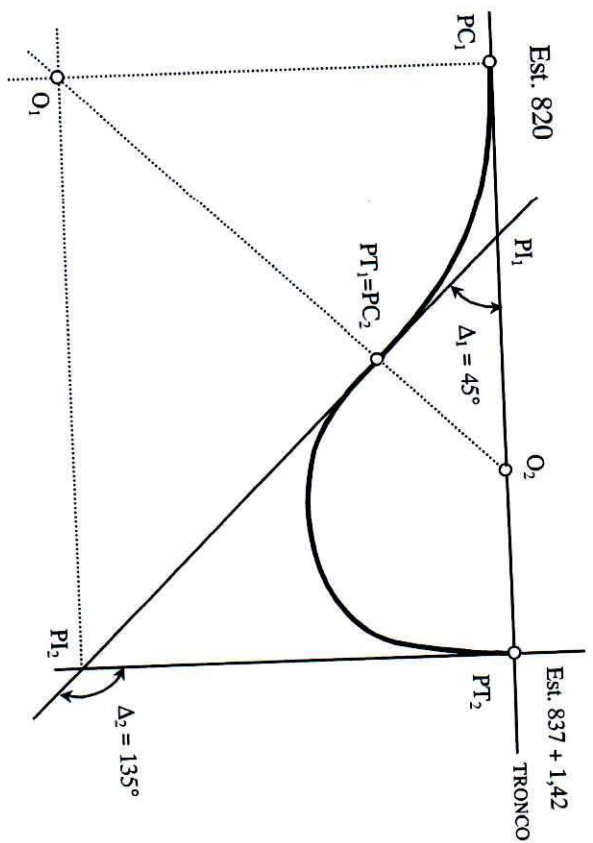


25. (\*) Num traçado com curvas horizontais circulares, conforme esquema da figura, desejando-se fazer  $R_1 = R_2$ :
- qual o maior raio possível?
  - qual o maior raio que se consegue usar, deixando um trecho reto de 80 m entre as curvas?

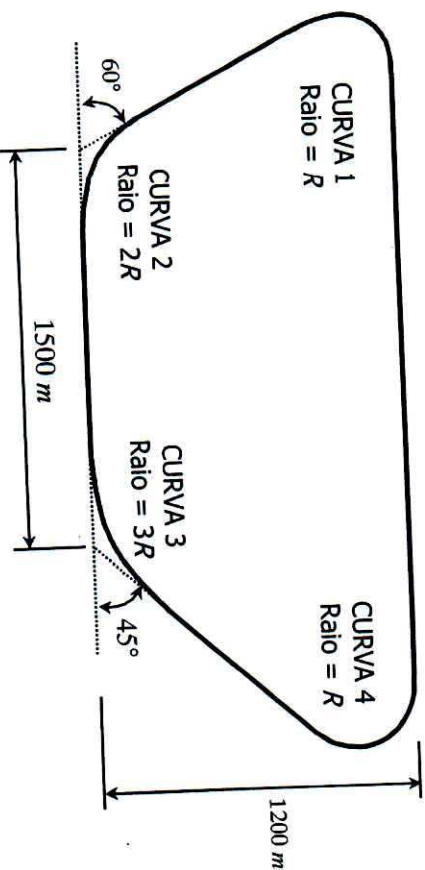


26. (EXAME NACIONAL DE CURSOS-1997) No projeto básico de um trecho da BR-101, a primeira tangente fez uma deflexão à direita de 90°, com o objetivo de preservar uma área de mata Atlântica. Originou-se o PI-1, localizado na estaca 81 + 19,00. Para a concordância horizontal necessária a essa deflexão, usou-se uma curva circular de raio igual a 600,00 metros. Quais as estacas dos pontos notáveis da curva (PC e PT)?

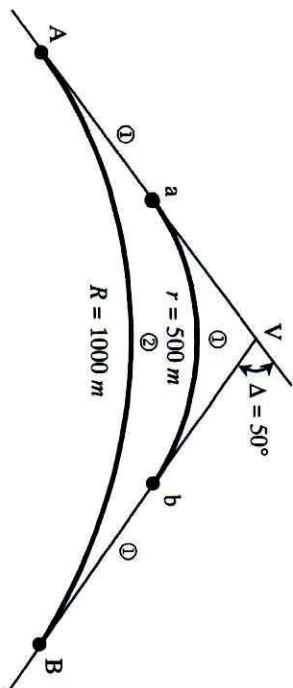
27. (\*) Deseja-se projetar um ramo de cruzamento com duas curvas reversas, conforme figura. A estaca zero do ramo coincide com a estaca 820 e o PT<sub>2</sub> coincide com a estaca 837+1,42 da estrada tronco. Calcular os valores de  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $E(PI_1)$  e  $E(PT_2)$ .



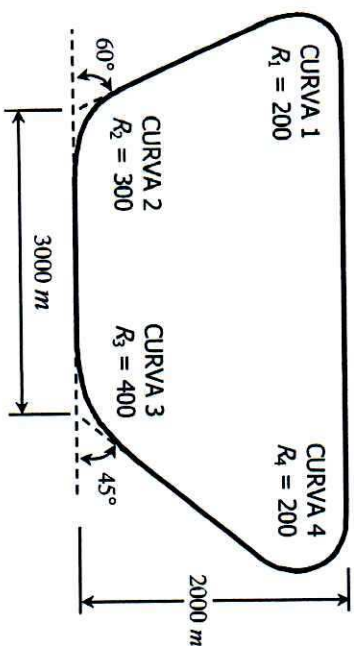
28. A figura é um esboço do projeto de um circuito. Calcule  $R$  (em metros), sabendo que o comprimento do circuito é 7.217,64 m. Todas as curvas são circulares simples.



29. Calcular a distância entre os pontos A e B pelos caminhos ① e ②.



30. Calcular o comprimento do circuito.

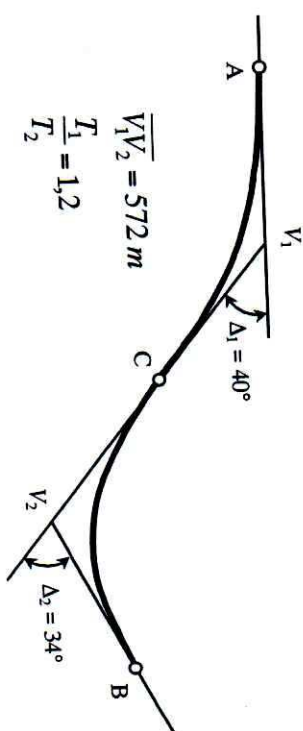


31. Numa curva composta com 2 centros temos:  $R_1 = 400\text{ m}$ ,  $R_2 = 300\text{ m}$ ,  $\Delta = 70^\circ$  e  $T_a = 120\text{ m}$ . Calcular os demais elementos.

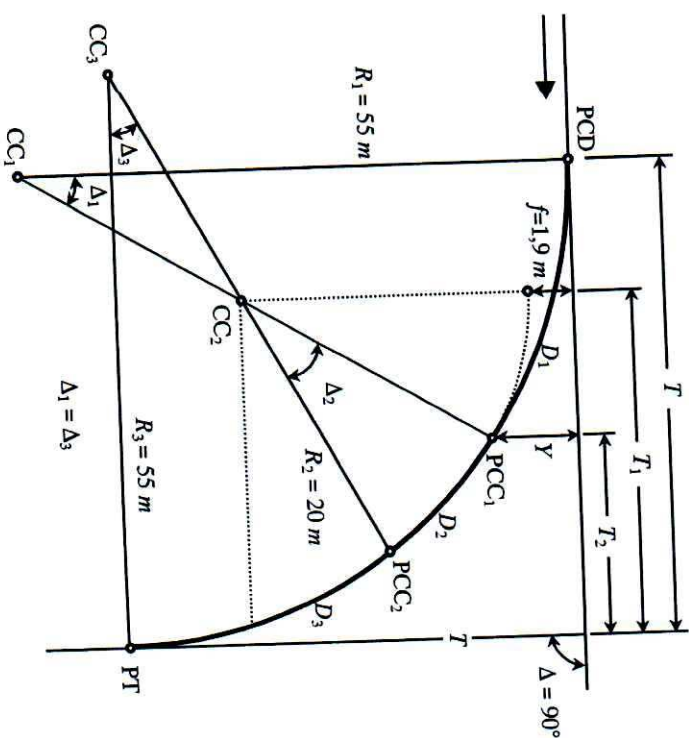
32. Idem:  $\Delta_2 = 30^\circ$ ,  $R_2 = 253\text{ m}$ ,  $\Delta = 74^\circ$  e  $T_b = 132\text{ m}$ . Calcular os demais elementos.

33. Idem:  $R_1 = 168\text{ m}$ ,  $\overline{AB} = 300\text{ m}$ , ângulo  $VAB = 35^\circ$  e ângulo  $VBA = 42^\circ$ . Calcular os demais elementos (vide figuras 4.6 e 4.7).

34. Dadas as curvas reversas da figura, calcular o comprimento do trecho entre os pontos A e B e os raios das curvas.



35. A figura abaixo representa um acesso-tipo do DERSA/SP. Calcular  $\Delta_1$ ,  $\Delta_2$ ,  $\Delta_3$ ,  $T$ ,  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $d$ ,  $X$  e  $Y$ .



36. (\*) Considere a localização em planta das tangentes de uma curva (figura 1) e a seção transversal da estrada (figura 2). Pede-se:

- Raio mínimo da curva circular. Verificar condição mínima de visibilidade e determinar o afastamento mínimo necessário do talude para uso do raio mínimo quanto à estabilidade.
- Calcular todos os elementos da curva circular.
- Calcular as coordenadas  $(x, y)$  dos pontos PC e PT da curva escolhida.

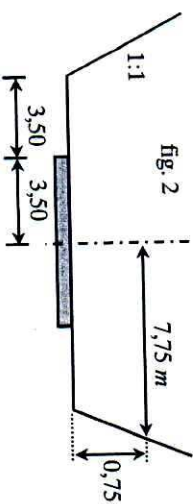
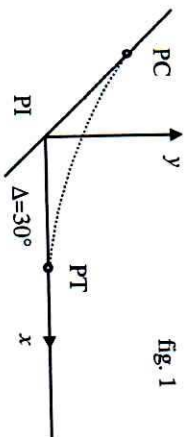
ADOTAR: Velocidade de projeto,  $V = 100 \text{ km/h}$

Coefficiente de atrito longitudinal,  $f_L = 0,3$

Máximo coeficiente de atrito transversal,  $f_T = 0,13$

Rampa,  $i = 0\%$

$e_{\max} = 12\%$



## CAPÍTULO 5

# CURVAS HORIZONTAIS DE TRANSIÇÃO

*"Num terra deve ser o machado que  
quebra o mar gelado em uso mesmo."*

**FRANZ KAFKA**  
Escritor tcheco

## INTRODUÇÃO

Ao passar um veículo de um alinhamento reto a uma curva circular, há uma variação instantânea do raio infinito da reta para o raio finito da curva circular, surgindo bruscamente uma força centrífuga que tende a desviar o veículo de sua trajetória.

Para assegurar o conforto e a segurança nas curvas e reduzir os incômodos dessa variação brusca da aceleração centrífuga, intercala-se entre a tangente e a curva circular uma curva de transição, na qual o raio de curvatura passe gradativamente do valor infinito ao valor do raio da curva circular.

Estas curvas de curvatura progressiva são chamadas de curvas de transição e são curvas cujo raio instantâneo varia em cada ponto, desde o valor  $R_c$  (na concordância com o trecho circular de raio  $R_c$ ) até o valor infinito (na concordância com o trecho em tangente).

Uma curva de transição exerce basicamente três funções:

- Proporciona um crescimento gradual da aceleração centrífuga que surge na passagem de um trecho reto para um trecho curvo.
- Constitui uma adequada extensão para efetuar o giro da pista até a posição superelevada em curva.
- Faz a transição gradual da trajetória do veículo em planta e conduz a um traçado fluente e visualmente satisfatório sob vários aspectos.

### TIPOS USUAIS DE CURVAS DE TRANSIÇÃO

Em princípio, qualquer curva cujo raio instantâneo varie ponto a ponto poderá ser utilizada como transição. Entretanto, a experiência mostrou que algumas curvas especiais oferecem vantagens pela maior facilidade de cálculo ou porque atendem melhor às exigências técnicas de um bom traçado.

As curvas mais usadas em projeto de estradas são:

1. Clotóide ou espiral de Cornu, onde o raio instantâneo de curvatura ( $R$ ) é inversamente proporcional ao desenvolvimento da curva ( $L$ ).
2. Lemniscata de Bernouille, onde o raio instantâneo de curvatura ( $R$ ) é inversamente proporcional ao raio vetor correspondente ( $p$ ).
3. Parábola cúbica ( $y = k \cdot x^3$ ).

De todas estas curvas, a mais amplamente utilizada é a espiral de Cornu. A clotóide, como também é chamada, foi estudada no ano de 1860 por Max Leber, e introduzida na prática da engenharia por L. Orley, no ano de 1937. No Brasil é bastante difundido o uso de espirais como curvas de transição. Recomenda-se sempre o uso de espirais simétricas no cálculo de curvas horizontais com transição ( $Ls_1=Ls_2=L_s$ ). O uso de espirais assimétricas ( $Ls_1 \neq Ls_2$ ) só é justificável em casos especiais.

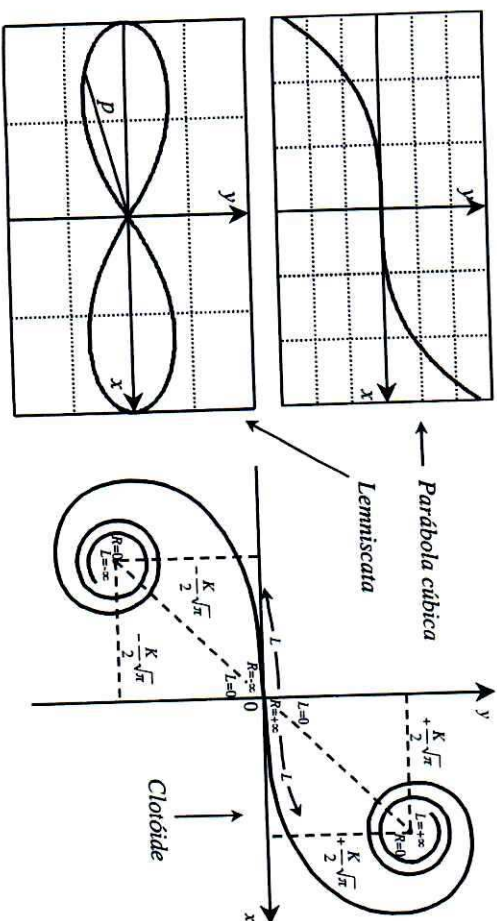


FIGURA 5.1a – Curvas de raio variável.

Considerando-se a maior conveniência técnica do uso da espiral, trataremos apenas desse tipo de curva. Para cada um dos pontos de uma clotoide, o produto do raio de curvatura  $R$  pelo seu comprimento desde a origem  $L$ , é igual a uma constante  $K^2$ . A magnitude  $K$  é chamada *parâmetro da clotoide*. As clotoídes de grandes parâmetros aumentam lentamente a sua curvatura e, por conseguinte, são aptas a serem percorridas com altas velocidades. Já as clotoídes de pequenos parâmetros aumentam rapidamente sua curvatura, e por isso, as velocidades de percurso tendem a ser menores.

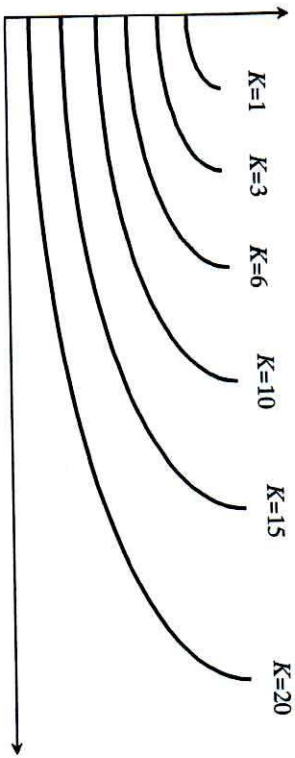


FIGURA 5.1b – Tipos de clotoídes.

Existem vários critérios diferentes visando orientar o estabelecimento do limite de emprego de curvas de transição. Para fins de projetos rodoviários convencionais, o DNER recomenda o critério associado à velocidade diretriz resumido pelos valores constantes da tabela 5.1 a seguir. Segundo esse critério, permite-se a dispensa do uso da curva de transição quando a aceleração centrífuga a que o veículo é submetido na curva for igual ou inferior a  $0,4 \text{ m/s}^2$ .

TABELA 5.1 – Valores-limite dos raios  $R$  acima dos quais podem ser dispensadas curvas de transição.

| $V_0$ (km/h) | 30  | 40  | 50  | 60  | 70  | 80   | 90   | 100  |
|--------------|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|
| $R$ (m)      | 170 | 300 | 500 | 700 | 950 | 1200 | 1550 | 1900 |

Fonte: DNER

### CURVA HORIZONTAL COM TRANSIÇÃO (simétrica)

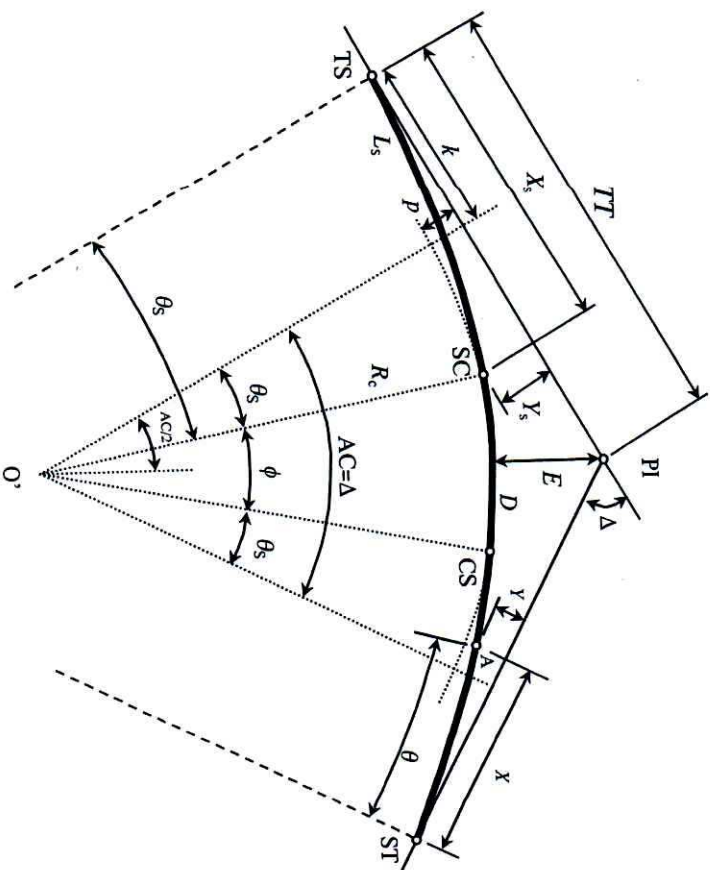


FIGURA 5.2 – Curva horizontal com espirais de transição simétricas.

|  |  |
|--|--|
| $O'$ = centro do trecho circular afastado  | $AC$ = ângulo central                      |
| $PI$ = ponto de interseção das tangentes   | $\Delta$ = deflexão das tangentes          |
| $A$ = ponto genérico da transição          | $D$ = desenvolvimento do trecho circular   |
| $X_s$ = abscissa dos pontos SC e CS        | $R_c$ = raio da curva circular             |
| $Y_s$ = ordenada dos pontos SC e CS        | $L_s$ = comprimento do trecho de transição |
| $TT$ = tangente total                      | $E$ = distância do $PI$ à curva circular   |
| $K$ = abscissa do centro $O'$              |  |
| $p$ = afastamento da curva circular        | Pontos notáveis:                           |
| $X$ = abscissa de um ponto genérico $A$    | $TS$ = tangente-espiral                    |
| $Y$ = ordenada de um ponto genérico $A$    | $SC$ = espiral-circular                    |
| $\theta_s$ = ângulo de transição           | $CS$ = circular-espiral                    |
| $\phi$ = ângulo central do trecho circular | $ST$ = espiral-tangente                    |

### CÁLCULO DOS ELEMENTOS DA ESPIRAL

(método do raio conservado)

Para a introdução das espirais de transição numa curva circular, há a necessidade do afastamento da curva em relação à tangente. Este afastamento ( $p$ ) pode ser obtido de três modos: método do centro conservado (redução do raio  $R_c$  para o valor  $R_c-p$ ), método do raio conservado (afastamento do centro  $O$  da curva circular para uma nova posição  $O'$ ) e método do raio e centro conservados (afastamento das tangentes a uma distância  $p$  da curva circular).

O método do raio conservado é geralmente o mais usado, pois não altera o valor do raio  $R_c$  da curva circular e a posição das tangentes.

Por definição, a clotoide é uma curva tal que os raios de curvatura em qualquer um de seus pontos é inversamente proporcional aos desenvolvimentos de seus respectivos arcos. Chamando  $L$  o comprimento do arco e  $R$  o raio de curvatura no extremo deste mesmo arco, a lei de curvatura da clotoide é expressa pela relação  $R.L = K^2$ , onde  $K$  é o parâmetro da clotoide. No ponto  $SC$  (figura 5.3) temos  $R = R_c$  e  $L = L_s$ . Sendo  $L_s$  o comprimento da transição (desenvolvimento entre os pontos  $TS$  e  $SC$ ) e  $R_c$  o raio da curva circular, a equação da espiral é:

$$R \cdot L = K^2 = R_c \cdot L_s \tag{5.1}$$

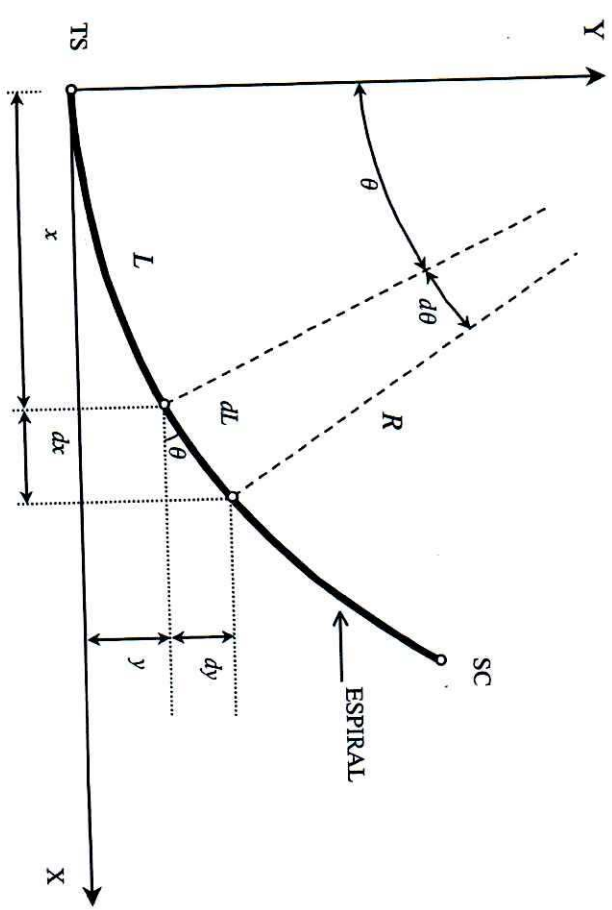


FIGURA 5.3 – Elementos da espiral.

Da figura 5.3, temos:

$$dL = R \cdot d\theta = \frac{K^2}{L} d\theta \quad \therefore \quad d\theta = \frac{L \, dL}{K^2}$$

$$\int d\theta = \int \frac{L \, dL}{K^2}$$

$$\theta = \frac{L^2}{2 \cdot K^2}$$

$$\theta = \frac{L^2}{2 \cdot R_c \cdot L_s}$$

(5.2)

Ainda com relação à figura 5.3, podemos obter a expressão:

$$\cos \theta = \frac{dx}{dL} \quad \therefore \quad dx = \cos \theta \, dL$$

Desenvolvendo  $\cos \theta$  em série de potências, temos:

$$dx = \left( 1 - \frac{\theta^2}{2!} + \frac{\theta^4}{4!} - \frac{\theta^6}{6!} + \dots \right) dL$$

$$\int dx = \int \left[ 1 - \frac{\left(\frac{L^2}{2K^2}\right)^2}{2!} + \frac{\left(\frac{L^2}{2K^2}\right)^4}{4!} - \frac{\left(\frac{L^2}{2K^2}\right)^6}{6!} + \dots \right] dL$$

$$x = \int \left[ 1 - \frac{L^4}{(2K^2)^2 \cdot 2!} + \frac{L^8}{(2K^2)^4 \cdot 4!} - \frac{L^{12}}{(2K^2)^6 \cdot 6!} + \dots \right] dL$$

$$x = L - \frac{L^5}{(2K^2)^2 \cdot 5 \cdot 2!} + \frac{L^9}{(2K^2)^4 \cdot 9 \cdot 4!} - \frac{L^{13}}{(2K^2)^6 \cdot 13 \cdot 6!} + \dots$$

$$x = L \cdot \left[ 1 - \frac{(L^2)^2}{(2K^2)^2 \cdot 5 \cdot 2!} + \frac{(L^2)^4}{(2K^2)^4 \cdot 9 \cdot 4!} - \frac{(L^2)^6}{(2K^2)^6 \cdot 13 \cdot 6!} + \dots \right]$$

$$x = L \cdot \left( \frac{\theta^0}{1 \cdot 0!} - \frac{\theta^2}{5 \cdot 2!} + \frac{\theta^4}{9 \cdot 4!} - \frac{\theta^6}{13 \cdot 6!} + \dots \right)$$

$$x = L \cdot \left( 1 - \frac{\theta^2}{10} + \frac{\theta^4}{216} - \frac{\theta^6}{9.360} + \dots \right)$$

(5.3a)

De maneira análoga, podemos obter a expressão para cálculo de  $y$ :

$$\text{sen } \theta = \frac{dy}{dL} \quad \therefore \quad dy = \text{sen } \theta \cdot dL$$

$$dy = \left( \theta - \frac{\theta^3}{3!} + \frac{\theta^5}{5!} - \frac{\theta^7}{7!} + \dots \right) dL$$

$$\int dy = L \cdot \left( \frac{\theta^1}{3 \cdot 1!} - \frac{\theta^3}{7 \cdot 3!} + \frac{\theta^5}{11 \cdot 5!} - \frac{\theta^7}{15 \cdot 7!} + \dots \right)$$

$$y = L \cdot \left( \frac{\theta}{3} - \frac{\theta^3}{42} + \frac{\theta^5}{1.320} - \frac{\theta^7}{75.600} + \dots \right)$$

(5.3b)

Generalizando, temos:

$$x = L \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n \cdot \theta^{2n}}{(4n+1) \cdot (2n)!} \quad \text{e} \quad y = L \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n \cdot \theta^{2n+1}}{(4n+3) \cdot (2n+1)!}$$

As equações 5.3a e 5.3b definem a clotóide pelo seu comprimento. Nestas equações, substituindo  $L$  por  $K \cdot \sqrt{2\theta}$  obtém-se:

$$x = K \sqrt{2\theta} \cdot \left( 1 - \frac{\theta^2}{10} + \frac{\theta^4}{216} - \frac{\theta^6}{9.360} + \dots \right)$$

$$y = K \sqrt{2\theta} \cdot \left( \frac{\theta}{3} - \frac{\theta^3}{42} + \frac{\theta^5}{1.320} - \frac{\theta^7}{75.600} + \dots \right)$$

que correspondem à equação da clotóide definida pelo seu parâmetro. No ponto SC da curva de transição, temos  $L = L_s$ . Logo, as equações para o cálculo de  $\theta_s$  (em radianos),  $X_s$  e  $Y_s$  são as seguintes:

$$\theta_s = \frac{L_s^2}{2 \cdot R_c \cdot L_s}$$

$$\theta_s = \frac{L_s}{2 \cdot R_c}$$

(5.4)

$$X_s = L_s \cdot \left( 1 - \frac{\theta_s^2}{10} + \frac{\theta_s^4}{216} - \frac{\theta_s^6}{9.360} + \dots \right)$$

(5.5)

$$Y_s = L_s \cdot \left( \frac{\theta_s}{3} - \frac{\theta_s^3}{42} + \frac{\theta_s^5}{1.320} - \frac{\theta_s^7}{75.600} + \dots \right)$$

(5.6)

Na prática, as expressões para  $X_s$  e  $Y_s$  podem ser reduzidas às expressões abaixo, com suficiente precisão:

$$X_s = L_s \cdot \left( 1 - \frac{\theta_s^2}{10} + \frac{\theta_s^4}{216} \right)$$

(5.5)

$$Y_s = L_s \cdot \left( \frac{\theta_s}{3} - \frac{\theta_s^3}{42} \right)$$

(5.6)



Calculados  $X_s$ ,  $Y_s$  e  $\theta_s$  e considerando os elementos da figura 5.4, podemos obter as seguintes relações:

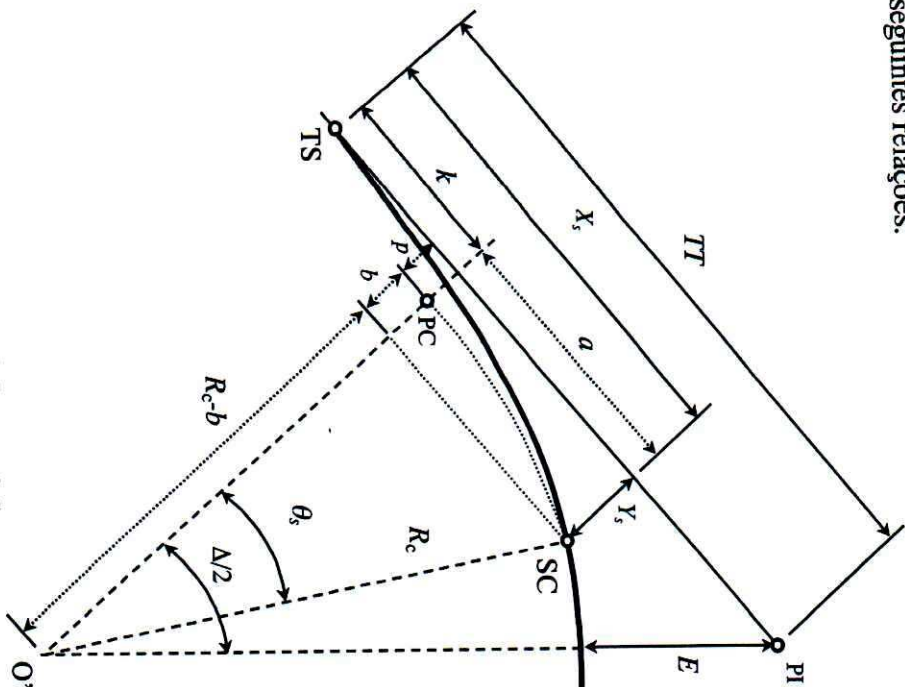


FIGURA 5.4 – Elementos da espiral de transição.

$$X_s = k + a \quad \therefore \quad k = X_s - a$$

$$Y_s = p + b \quad \therefore \quad p = Y_s - b$$

$$\operatorname{sen} \theta_s = \frac{a}{R_c} \quad \therefore \quad a = R_c \cdot \operatorname{sen} \theta_s$$

$$\cos \theta_s = \frac{R_c - b}{R_c} \quad \therefore \quad b = R_c \cdot (1 - \cos \theta_s)$$

$$\tan \left( \frac{\Delta}{2} \right) = \frac{TT - k}{R_c + p} \quad (5.7)$$

$$\cos \left( \frac{\Delta}{2} \right) = \frac{R_c + p}{R_c + E} \quad (5.8)$$

Mesclando as equações acima, obtemos as expressões para cálculo da abscissa do centro  $O'$  ( $k$ ) e do afastamento da curva circular ( $p$ ):

$$k = X_s - R_c \cdot \operatorname{sen} \theta_s \quad (5.9)$$

$$p = Y_s - R_c \cdot (1 - \cos \theta_s) \quad (5.10)$$

Da equação 5.7, resulta a expressão para cálculo da tangente total:

$$TT = k + (R_c + p) \cdot \tan \left( \frac{\Delta}{2} \right) \quad (5.11)$$

Da equação 5.8, resulta a expressão para cálculo da distância do PI ao ponto médio da curva circular ( $E$ ):

$$E = \frac{R_c + p}{\cos\left(\frac{\Delta}{2}\right)} - R_c \quad (5.12)$$

As estacas dos pontos notáveis da curva são calculadas pelas expressões:

$$E(TS) = E(PI) - [TT] \quad (5.13)$$

$$E(SC) = E(TS) + [L_s] \quad (5.14)$$

$$E(CS) = E(SC) + [D] \quad (5.15)$$

$$E(ST) = E(CS) + [L_s] \quad (5.16)$$

Para o cálculo do desenvolvimento da curva circular ( $D$ ), a expressão é a seguinte (para espirais simétricas):

$$\phi = \Delta - 2 \cdot \theta_s \quad (5.17)$$

$$D = R_c \cdot \phi \quad (5.18)$$

Na equação 5.18,  $D$  e  $R_c$  são dados em metros e  $\phi$  em radianos. Para  $\phi$  em graus, a equação é a seguinte:

$$D = \frac{R_c \cdot \phi^\circ \cdot \pi}{180^\circ} \quad (5.19)$$

O valor de  $D$  necessariamente deverá ser não negativo. Quando forem escolhidos valores de  $L_s$  muito grandes, pode acontecer  $2\theta_s > \Delta$ , isto é,  $D < 0$ . Nesse caso, os valores de  $L_s$  devem ser diminuídos de forma que tenhamos sempre  $D \geq 0$ .

### COMPRIMENTO MÍNIMO DE TRANSIÇÃO (Critério dinâmico)

Como visto anteriormente, ao passar um veículo de um alinhamento reto a uma curva circular, há uma variação instantânea do raio infinito da reta para o raio finito da curva circular, surgindo bruscamente uma força centrífuga que tende a desviar o veículo de sua trajetória.

Para minimizar este inconveniente, além de se usar uma curva de transição, seu comprimento deve ser adequado para que o efeito da força centrífuga apareça de maneira gradual.

Da física, a aceleração centrífuga que atua num veículo em trajetória circular é dada por:

$$\frac{d}{dt}(a_c) = J$$

Em qualquer ponto da clotoide, temos:

$$R \cdot L = R_c \cdot L_s$$

$$R = \frac{R_c \cdot L_s}{L}$$

onde:

$$a_c = \frac{v^2 \cdot L}{R_c \cdot L_s}$$

Sendo o comprimento de transição  $L_s$  igual ao produto da velocidade uniforme do veículo pelo tempo que o mesmo necessita para percorrer a clotoide, temos:

$$L = v \cdot t$$

Logo:

$$a_c = \frac{v^2 \cdot v \cdot t}{R_c \cdot L_s} = \frac{v^3 \cdot t}{R_c \cdot L_s}$$

Como a variação da aceleração centrífuga que atua sobre o veículo deve ser constante:

$$\frac{d}{dt}(a_c) = J$$

então, temos:

$$J = \frac{v^3}{R_c \cdot L_s}$$

O valor da constante  $J$  mede a sollicitação radial ou reação transversal que experimentam os passageiros dos veículos devido à variação da força centrífuga. O valor aceitável para  $J$  varia para cada condutor. Experiências comprovaram que os valores ideais estão entre 0,3 e 0,8  $m/s^3$ . BARNETT, em seu trabalho *Transition Curves for Highways*, recomenda o valor  $J_{\max} = 0,6 m/s^3$ , valor este adotado pelo DNER. Sendo  $J_{\max} = 0,6 m/s^3$ ,  $R_c$  em metros e  $V$  em  $km/h$ , o comprimento mínimo do trecho de transição, em metros, será:

$$Ls_{\min} = \frac{v^3}{J_{\max} \cdot R_c} = \frac{\left(\frac{V}{3,6}\right)^3}{0,6 \cdot R_c}$$

$$Ls_{\min} = 0,036 \cdot \frac{V^3}{R_c}$$

(5.21)

Sempre que possível devem ser adotados para  $L_s$  valores maiores que o mínimo calculado pela equação 5.21, de preferência  $(Ls_{\min} + Ls_{\max})/2$  ou  $3 Ls_{\min}$ , desde que estes valores sejam menores que  $Ls_{\max}$ .

Pelo critério de tempo de percurso na transição, o comprimento mínimo da transição corresponde à distância percorrida pelo veículo à velocidade diretriz, durante 2 segundos. Logo, o comprimento mínimo da transição de acordo com esse critério é dado pela fórmula a seguir, com  $V$  em  $km/h$  e  $Ls_{min}$  em metros:

$$Ls_{min} = 0,556 \cdot V \quad (5.22)$$

### COMPRIENTO MÁXIMO DE TRANSIÇÃO

Corresponde a um valor nulo para o desenvolvimento do trecho circular ( $D = 0$ ), ou seja, as espirais se encontram. Então:

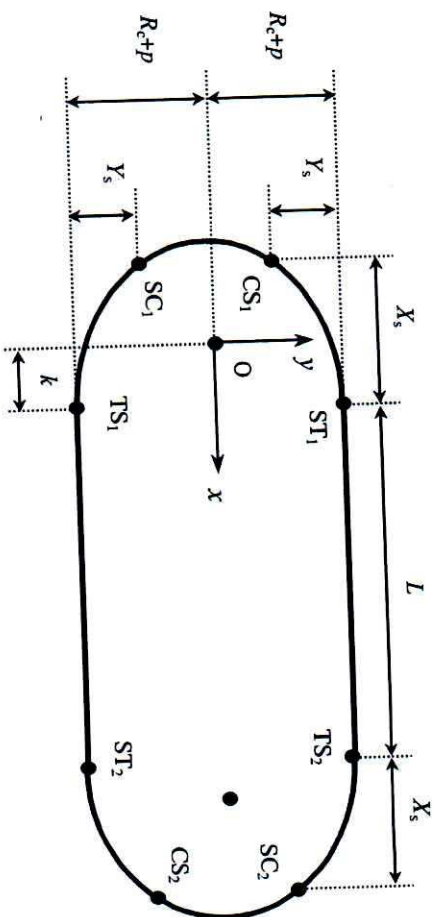
$$\phi = \Delta - 2 \cdot \theta_s = 0 \quad \therefore \quad \Delta = 2 \cdot \theta_s = 2 \cdot \frac{Ls_{max}}{2 \cdot R_c}$$

$$Ls_{max} = R_c \cdot \Delta \quad (5.23)$$

Sendo  $Ls_{max}$  e  $R_c$  em metros,  $\Delta$  em radianos. Para  $\Delta$  em graus, a equação fica:

$$Ls_{max} = \frac{R_c \cdot \Delta \cdot \pi}{180^\circ} \quad (5.24)$$

**EXEMPLO 1:** Calcular as coordenadas  $(x,y)$  dos pontos TS, SC, CS e ST em relação ao sistema de eixos da figura (extraído das notas de aula do professor Carlos Reynaldo Toledo Pimenta).



**Solução:**

- |                                  |                                     |
|----------------------------------|-------------------------------------|
| $TS_1 (k; -R_c - p)$             | $TS_2 (k + L; R_c + p)$             |
| $SC_1 (-X_s + k; Y_s - R_c - p)$ | $SC_2 (X_s + k + L; R_c + p - Y_s)$ |
| $CS_1 (R_c + p - Y_s; k - X_s)$  | $CS_2 (X_s + k + L; Y_s - R_c - p)$ |
| $ST_1 (k; R_c + p)$              | $ST_2 (k + L; -R_c - p)$            |

**EXEMPLO 2:** Numa curva de uma rodovia, temos os seguintes elementos:  
 $V = 80 \text{ km/h}$ ,  $\Delta = 35^\circ$ ,  $R_c = 500 \text{ m}$  e  $E(PI) = 228 + 17,00$ . Determinar  $Ls_{min}$ ,  
 $Ls_{max}$ ,  $\theta_s$ ,  $X_s$ ,  $Y_s$ ,  $\phi$ ,  $D$ ,  $k$ ,  $p$ ,  $TT$ ,  $E$ ,  $E(TS)$ ,  $E(SC)$ ,  $E(CS)$ ,  $E(ST)$ .

**Solução:**

$$Ls_{\min} = 0,036 \cdot \frac{V^3}{R_c} = 0,036 \cdot \frac{80^3}{500} = 36,86 \text{ m}$$

$$Ls_{\max} = \frac{R_c \cdot \Delta \cdot \pi}{180^\circ} = \frac{500 \cdot 35^\circ \cdot \pi}{180^\circ} = 305,43 \text{ m}$$

Adotando  $L_s = 120 \text{ m}$   
( $\approx 3 Ls_{\min}$ )

$$\theta_s = \frac{L_s}{2 \cdot R_c} = \frac{120}{2 \cdot 500} = 0,1200 \text{ rad}$$

$$X_s = L_s \cdot \left( 1 - \frac{\theta_s^2}{10} + \frac{\theta_s^4}{216} \right) = 120 \cdot \left( 1 - \frac{0,12^2}{10} + \frac{0,12^4}{216} \right) = 119,83 \text{ m}$$

$$Y_s = L_s \cdot \left( \frac{\theta_s}{3} - \frac{\theta_s^3}{42} \right) = 120 \cdot \left( \frac{0,12}{3} - \frac{0,12^3}{42} \right) = 4,80 \text{ m}$$

$$\phi = \Delta - 2 \cdot \theta_s = 35^\circ - \frac{\pi}{180^\circ} \cdot 2 \cdot 0,12 = 0,370867 \text{ rad}$$

$$D = R_c \cdot \phi = 500 \cdot (0,370867 \text{ rad}) = 185,43 \text{ m} = 9 \text{ est} + 5,43 \text{ m}$$

$$k = X_s - R_c \cdot \text{sen} \theta_s = 119,83 - 500 \cdot \text{sen}(0,12 \text{ rad}) = 59,98 \text{ m}$$

$$p = Y_s - R_c \cdot (1 - \cos \theta_s) = 4,80 - 500 \cdot [1 - \cos(0,12 \text{ rad})] = 1,20 \text{ m}$$

$$TT = k + (R_c + p) \cdot \tan \left( \frac{\Delta}{2} \right) = 59,98 + (500 + 1,20) \cdot \tan \left( \frac{35^\circ}{2} \right) = 218,00 \text{ m}$$

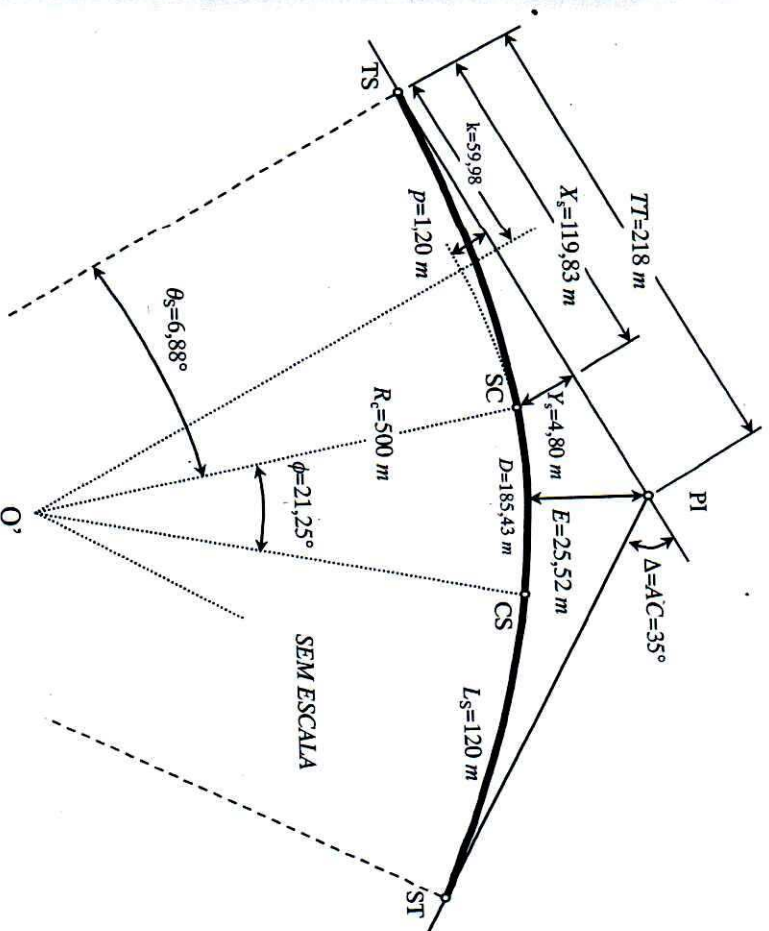
$$E = \frac{R_c + p}{\cos \left( \frac{\Delta}{2} \right)} - R_c = \frac{500 + 1,20}{\cos \left( \frac{35^\circ}{2} \right)} - 500 = 25,52 \text{ m}$$

$$E(TS) = E(PI) - [TT] = (228 + 17,00) - (10 + 18,00) = 217 + 19,00$$

$$E(SC) = E(TS) + [L_s] = (217 + 19,00) + (6 + 0,00) = 223 + 19,00$$

$$E(CS) = E(SC) + [D] = (223 + 19,00) + (9 + 5,43) = 233 + 4,43$$

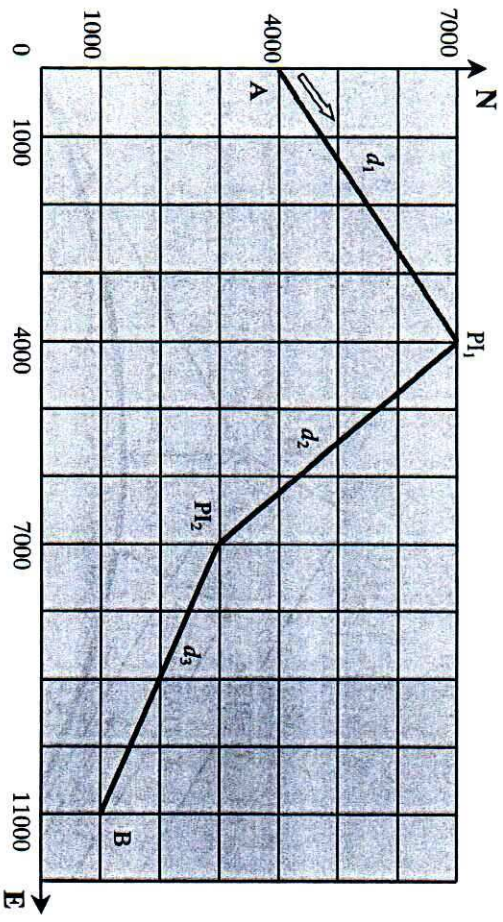
$$E(ST) = E(CS) + [L_s] = (233 + 4,43) + (6 + 0,00) = 239 + 4,43$$



**EXEMPLO 3:** Calcular as estacas dos pontos notáveis das curvas e a

estaca final do traçado (ponto B), sendo dados:

- a) Estaca inicial do traçado (ponto A) = 0 + 0,00
- b) Raio da curva 1 = 600 m (transição)
- c) Raio da curva 2 = 1000 m (circular)
- d)  $V_p = 60 \text{ km/h}$



**Solução:**

Coordenadas:

| Pontos          | N     | E      |
|-----------------|-------|--------|
| A               | 4.000 | 0      |
| PI <sub>1</sub> | 7.000 | 4.000  |
| PI <sub>2</sub> | 3.000 | 7.000  |
| B               | 1.000 | 11.000 |

Cálculo dos azimutes:

$$Az_1 = \arctan\left(\frac{0 - 4000}{4000 - 7000}\right) = \arctan\left(\frac{4}{3}\right) = 53,13^\circ$$

$$Az_2 = 180^\circ + \arctan\left(\frac{4000 - 7000}{7000 - 3000}\right) = 143,13^\circ$$

$$Az_3 = 180^\circ + \arctan\left(\frac{7000 - 11000}{3000 - 1000}\right) = 116,57^\circ$$

Cálculo dos ângulos centrais:

$$\Delta_1 = Az_2 - Az_1 = 143,13^\circ - 53,13^\circ = 90^\circ$$

$$\Delta_2 = |Az_3 - Az_2| = 143,13^\circ - 116,57^\circ = 26,57^\circ$$

Cálculo dos comprimentos dos alinhamentos:

$$d_1 = \sqrt{(4000 - 7000)^2 + (0 - 4000)^2} = 5000 \text{ m}$$

$$d_2 = \sqrt{(7000 - 3000)^2 + (4000 - 7000)^2} = 5000 \text{ m}$$

$$d_3 = \sqrt{(3000 - 1000)^2 + (7000 - 11000)^2} = 4472,14 \text{ m}$$

Cálculo da curva 1 (transição):

$$E(PI_1) = [d_1] = 250 \text{ est} + 0,00 \text{ m}$$

$$R_1 = 600 \text{ m}$$

$$\Delta_1 = 90^\circ$$

$$V_p = 60 \text{ km/h}$$

$$LS_{\min} = 12,96 \text{ m}$$

$$LS_{\max} = 942,48 \text{ m}$$

$$LS_{\text{adotado}} = 200 \text{ m}$$

$$\theta_s = 0,166667 \text{ rad}$$

$$\phi = 1,237463 \text{ rad}$$

$$X_s = 199,45 \text{ m}$$

$$Y_s = 11,09 \text{ m}$$

$$k = 99,91 \text{ m}$$

$$p = 2,78 \text{ m}$$

$$TT = 702,68 \text{ m}$$

$$D = 742,48 \text{ m}$$

$$E(TS) = 214 + 17,32$$

$$E(SC) = 224 + 17,32$$

$$E(CS) = 261 + 19,80$$

$$E(ST) = 271 + 19,80$$

Cálculo da curva 2 (circular):

$$R_2 = 1000 \text{ m}$$

$$\Delta_2 = 26,57^\circ$$

$$E(PI_2) = E(ST) + [d_2] - [TT]$$

$$E(PI_2) = (271 + 19,80) + (250 + 0,00) - (35 + 2,68) = 486 + 17,12$$

$$T = 236,11 \text{ m}$$

$$D = 463,73 \text{ m}$$

$$E(PC) = 475 + 1,01$$

$$E(PT) = 498 + 4,74$$

Estaca final do traçado (ponto B):

$$E(B) = E(PT) + [d_3] - [T]$$

$$E(B) = (498 + 4,74) + (223 + 12,14) - (11 + 16,11) = 710 \text{ est} + 0,77 \text{ m}$$

### LOCAÇÃO DE CURVAS DE TRANSIÇÃO

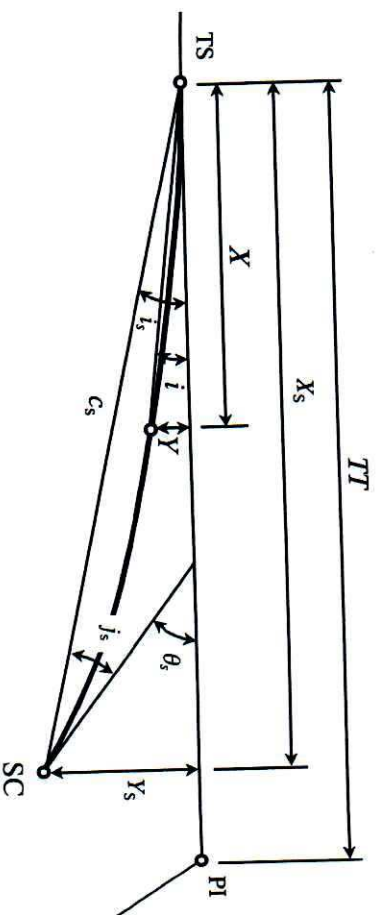


FIGURA 5.5a – Elementos para localização da espiral de transição.

Dados  $R_c$ ,  $L_s$ ,  $\Delta$ ,  $E(\text{PI})$  e fixadas as direções das tangentes, calcula-se os valores de  $X_s$ ,  $Y_s$ ,  $\theta_s$ ,  $P$ ,  $k$  e  $TT$ . A locação da curva de transição é iniciada pela localização do ponto TS sobre a primeira tangente a uma distância  $TT$  do ponto de interseção PI, quando este for acessível. Para o caso do PI ser inacessível (figura 5.5b), procede-se da seguinte maneira:

- Prolongar as direções das tangentes já conhecidas no sentido do PI.
- Escolher dois pontos A e B em locais convenientes.
- Determinar a distância  $\overline{AB}$  e os ângulos  $\alpha$  e  $\beta$ .
- Calcular as distâncias  $t_1$  e  $t_2$ .

Aplicando a lei dos senos no triângulo da figura 5.5b, temos:

$$a = c \cdot \frac{\text{sen } \alpha}{\text{sen } \theta} \quad e \quad b = c \cdot \frac{\text{sen } \beta}{\text{sen } \theta}$$

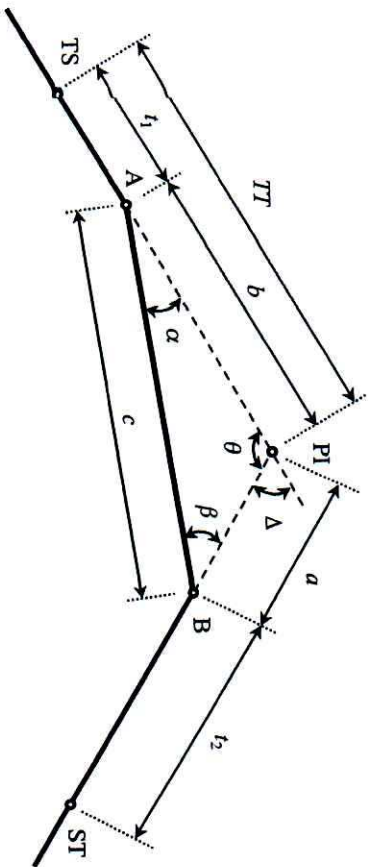


FIGURA 5.5b – Procedimento para PI inacessível.

Como  $\text{sen } \theta = \text{sen}(180^\circ - \alpha - \beta) = \text{sen}(\alpha + \beta)$ , temos:

$$a = c \cdot \frac{\text{sen } \alpha}{\text{sen}(\alpha + \beta)} \quad e \quad b = c \cdot \frac{\text{sen } \beta}{\text{sen}(\alpha + \beta)}$$

Logo:

$$t_1 = TT - b$$

$$t_2 = TT - a$$

As distâncias  $t_1$  e  $t_2$ , assim calculadas, permitem a localização do TS e do ST. Feito isto, e com o instrumento centrado no TS, dá-se início à locação do primeiro ramo da espiral, que poderá ser locado pelo método de ordenadas sobre a tangente com o uso dos valores calculados para X e Y (equações 5.26 e 5.27) ou pelo método das deflexões sobre a tangente, usando-se para isso os ângulos de deflexão  $i$  e os comprimentos dos arcos correspondentes  $c$ , obtidos através das equações 5.28 e 5.29.

$$\theta = \frac{L^2}{2 \cdot R_c \cdot L_s} \quad (5.25)$$

$$X = L \cdot \left( 1 - \frac{\theta^2}{10} + \frac{\theta^4}{216} \right) \quad (5.26)$$

$$Y = L \cdot \left( \frac{\theta}{3} - \frac{\theta^3}{42} \right) \quad (5.27)$$



$$i = \arctan\left(\frac{Y}{X}\right) \quad (5.28)$$

$$c = \frac{X}{\cos i} \quad (5.29)$$

onde:

$$i_s = \arctan\left(\frac{Y_s}{X_s}\right) \quad (5.30)$$

$$c_s = \frac{X_s}{\cos i_s} \quad (5.31)$$

$$j_s = \theta_s - i_s \quad (5.32)$$

Feita a locação da espiral pelo método das deflexões, muda-se o instrumento para o SC e visa-se o TS com a deflexão  $j_s = \theta_s - i_s$ , lida no sentido da curvatura. Quando se voltar o instrumento a zero, tem-se a direção da tangente no SC, que permite realizar a locação da curva circular pelo processo das deflexões.

O procedimento para locar o segundo ramo é idêntico. Centra-se o instrumento no ST e loca-se no sentido ST para o CS, usando-se as deflexões anteriormente calculadas. Em qualquer método usado é sempre aconselhável o cálculo de  $i_s$  e da corda  $c_s$  para a verificação da locação executada. Calculados todos os elementos, confecciona-se a tabela de locação representada abaixo.

TABELA 5.2 – Locação de curvas de transição.

| TABELA DE LOCAÇÃO |   |   |   |   |
|-------------------|---|---|---|---|
| ESTACA            | L | X | Y | i |
| TS                |   |   |   |   |
| ⋮                 |   |   |   |   |
| SC                |   |   |   |   |
| $c_s =$           |   |   |   |   |
| $j_s =$           |   |   |   |   |

**EXEMPLO 4:** Construir a tabela de locação do primeiro ramo de transição da curva do exemplo 2.

**Solução:** Cálculo dos elementos da linha correspondente à estaca 222 + 0,00 (o cálculo é semelhante para todas as outras linhas da tabela de locação).

Distância entre a estaca 222 + 0,00 e o TS:

$$L = 81 \text{ m}$$

$$\theta = \frac{L^2}{2 \cdot R_c \cdot L_s} = \frac{81^2}{2 \cdot 500 \cdot 120} = 0,054675 \text{ rad}$$

$$X = L \cdot \left( 1 - \frac{\theta^2}{10} + \frac{\theta^4}{216} \right) = 81 \cdot \left( 1 - \frac{0,054675^2}{10} + \frac{0,054675^4}{216} \right) = 80,9758 \text{ m}$$

$$Y = L \cdot \left( \frac{\theta}{3} - \frac{\theta^3}{42} \right) = 81 \cdot \left( \frac{0,054675}{3} - \frac{0,054675^3}{42} \right) = 1,4759 \text{ m}$$

$$i = \arctan \left( \frac{Y}{X} \right) = \arctan \left( \frac{1,4759}{80,9758} \right) = 1,044183^\circ = 1^\circ 02' 39''$$

$$c = \frac{X}{\cos i} = \frac{80,9758}{\cos(1,044183^\circ)} = 80,9893 \text{ m}$$

$$i_s = \arctan \left( \frac{Y}{X_s} \right) = \arctan \left( \frac{4,80}{119,83} \right) = 2,293856^\circ = 2^\circ 17' 37,88''$$

$$c_s = \frac{X_s}{\cos i_s} = \frac{119,83}{\cos(2,293856^\circ)} = 119,926 \text{ m}$$

$$j_s = \theta_s - i_s = 0,1200 - 0,040035 = 0,079965 \text{ rad}$$

$$j_s = \theta_s - i_s = 4,581638^\circ = 4^\circ 34' 53,90''$$

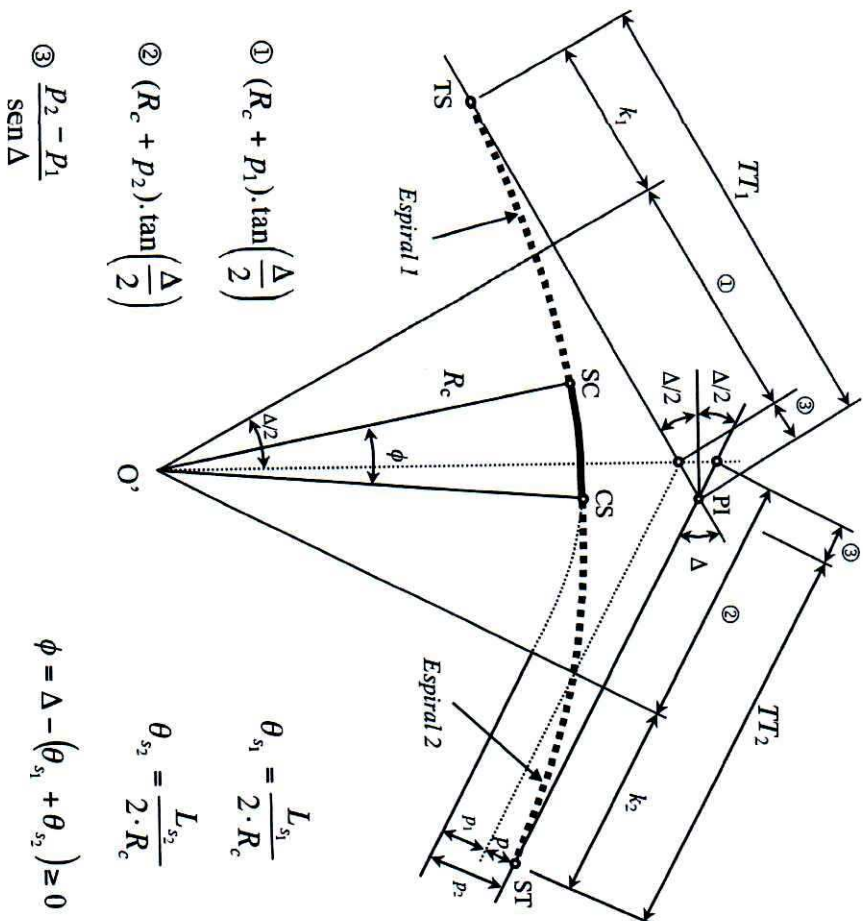
TABELA DE LOCAÇÃO

| ESTACA   | ESTACA |        | L      | X      | Y    | i          |
|----------|--------|--------|--------|--------|------|------------|
|          | INT    | FRAC   |        |        |      |            |
| (TS) 217 | +19,00 | ---    | ---    | ---    | ---  | ---        |
| 218      | +10,00 | 11,00  | 11,00  | 11,00  | 0,00 | 0° 01' 09" |
| 219      |        | 21,00  | 21,00  | 21,00  | 0,03 | 0° 04' 13" |
|          | +10,00 | 31,00  | 31,00  | 31,00  | 0,08 | 0° 09' 11" |
| 220      |        | 41,00  | 41,00  | 41,00  | 0,19 | 0° 16' 03" |
|          | +10,00 | 51,00  | 51,00  | 51,00  | 0,37 | 0° 24' 50" |
| 221      |        | 61,00  | 60,99  | 60,99  | 0,63 | 0° 35' 32" |
|          | +10,00 | 71,00  | 70,99  | 70,99  | 0,99 | 0° 48' 08" |
| 222      |        | 81,00  | 80,98  | 80,98  | 1,48 | 1° 02' 39" |
|          | +10,00 | 91,00  | 90,96  | 90,96  | 2,09 | 1° 19' 04" |
| 223      |        | 101,00 | 100,93 | 100,93 | 2,86 | 1° 37' 24" |
| (SC) 223 | +19,00 | 120,00 | 119,83 | 4,80   |      | 2° 17' 30" |

$c_s = 119,93 \text{ m}$   
 $i_s = 4^\circ 34' 53,90''$

## CURVA CIRCULAR COM TRANSIÇÕES ASSIMÉTRICAS

São curvas que possuem transições com comprimentos diferentes. Com exceção dos valores de  $TT_1$  e  $TT_2$ , os demais elementos das transições são calculados de forma análoga às espirais simétricas.



$$\textcircled{1} (R_c + p_1) \cdot \tan\left(\frac{\Delta}{2}\right)$$

$$\theta_{s1} = \frac{L_{s1}}{2 \cdot R_c}$$

$$\textcircled{2} (R_c + p_2) \cdot \tan\left(\frac{\Delta}{2}\right)$$

$$\theta_{s2} = \frac{L_{s2}}{2 \cdot R_c}$$

$$\textcircled{3} \frac{p_2 - p_1}{\text{sen } \Delta}$$

$$\phi = \Delta - (\theta_{s1} + \theta_{s2}) \geq 0$$

FIGURA 5.6 – Curva horizontal circular com transições assimétricas (Fonte: PIMENTA).

Segundo o professor Carlos Reynaldo Toledo Pimenta, definidos os valores dos comprimentos  $L_{s1}$  e  $L_{s2}$  das espirais de transição, as equações de cálculo da curva para  $L_{s2} > L_{s1}$  são as seguintes:

### ESPIRAL 1

$$X_{s1} = L_{s1} \cdot \left( 1 - \frac{\theta_{s1}^2}{10} + \frac{\theta_{s1}^4}{216} - \dots \right)$$

$$Y_{s1} = L_{s1} \cdot \left( \frac{\theta_{s1}}{3} - \frac{\theta_{s1}^3}{42} + \frac{\theta_{s1}^5}{1320} + \dots \right)$$

$$k_1 = X_{s1} - R_c \cdot \text{sen } \theta_{s1}$$

$$p_1 = Y_{s1} - R_c \cdot (1 - \text{cos } \theta_{s1})$$

$$TT_1 = k_1 + (R_c + p_1) \cdot \tan\left(\frac{\Delta}{2}\right) + \frac{p_2 - p_1}{\text{sen } \Delta}$$

### ESPIRAL 2

$$X_{s2} = L_{s2} \cdot \left( 1 - \frac{\theta_{s2}^2}{10} + \frac{\theta_{s2}^4}{216} - \dots \right)$$

$$Y_{s_2} = L_{s_2} \cdot \left( \frac{\theta_{s_2}^3}{3} - \frac{\theta_{s_2}^5}{42} + \frac{\theta_{s_2}^7}{1320} + \dots \right)$$

$$k_2 = X_{s_2} - R_c \cdot \text{sen} \theta_{s_2}$$

$$P_2 = Y_{s_2} - R_c \cdot (1 - \cos \theta_{s_2})$$

$$TT_2 = k_2 + (R_c + P_2) \cdot \tan \left( \frac{\Delta}{2} \right) + \frac{P_2 - P_1}{\text{sen} \Delta}$$

**CURVAS COMPOSTAS COM TRANSIÇÃO**

Esta concordância é utilizada quando se deseja tornar contínua a variação da curvatura entre duas curvas circulares consecutivas de raios diferentes, como mostram as figuras 5.7 e 5.8.

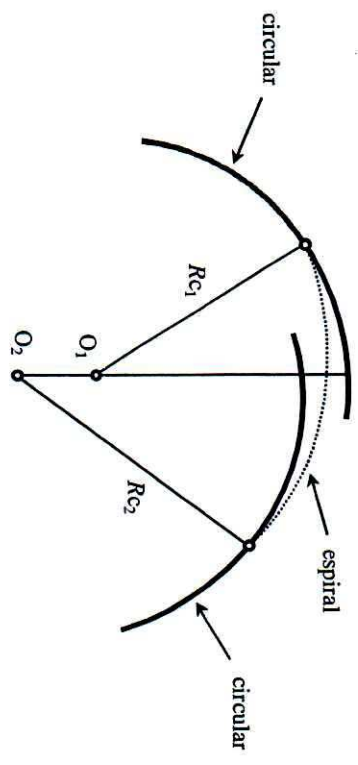


FIGURA 5.7 – Concordância de curvas circulares com espiral.

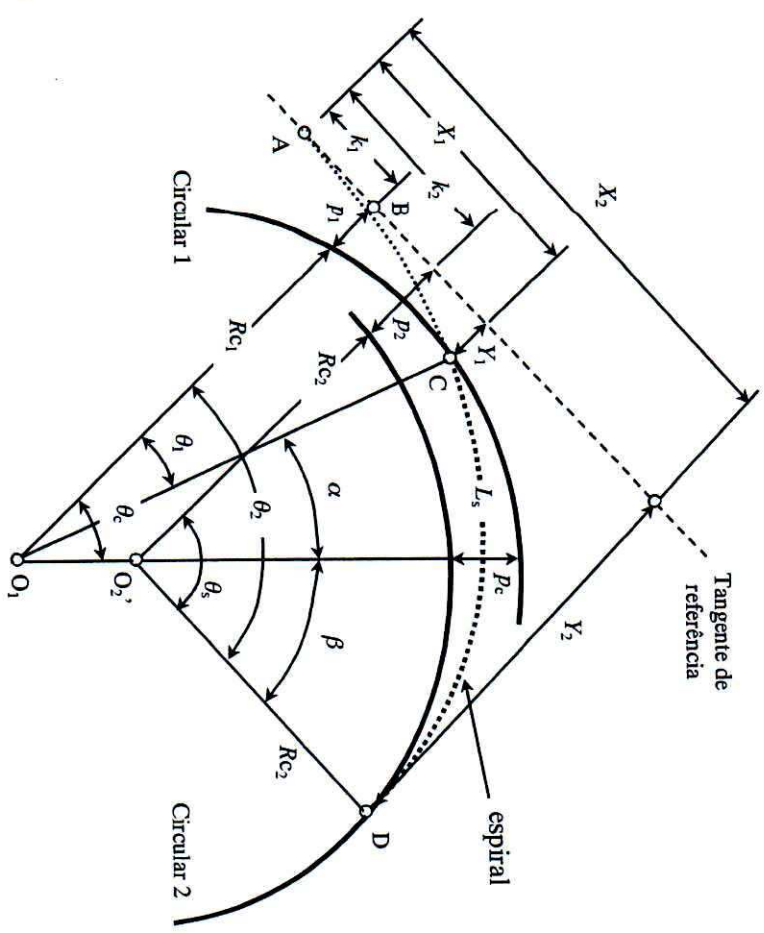


FIGURA 5.8 – Curva composta com transição (Fonte: PIMENTA).

Sendo  $L_1$  o comprimento da espiral entre os pontos A e C, e  $L_2$  o comprimento da espiral entre os pontos A e D, temos:

$$R_{c_1} \cdot L_1 = K^2 \quad (\text{ponto C})$$

$$R_{c_2} \cdot L_2 = K^2 \quad (\text{ponto D})$$

$$L_s = L_2 - L_1$$

$$L_s = L_1 \cdot \frac{R_{q_1} - R_{c_2}}{R_{c_2}}$$

Adotando-se um valor para  $L_s$ , temos:

$$L_1 = L_s \cdot \frac{R_{c_2}}{R_{q_1} - R_{c_2}}$$

$$\theta_1 = \frac{L_1}{2 \cdot R_{q_1}} = \frac{L_s \cdot R_{c_2}}{2 \cdot R_{q_1} \cdot (R_{q_1} - R_{c_2})}$$

$$X_1 = L_1 \cdot \left( 1 - \frac{\theta_1^2}{10} + \frac{\theta_1^4}{216} - \dots \right)$$

$$Y_1 = L_1 \cdot \left( \frac{\theta_1}{3} - \frac{\theta_1^3}{42} + \frac{\theta_1^5}{1320} + \dots \right)$$

$$k_1 = X_1 - R_{q_1} \cdot \text{sen} \theta_1$$

$$p_1 = Y_1 - R_{q_1} \cdot (1 - \text{cos} \theta_1)$$

$$L_2 = L_s \cdot \frac{R_{q_1}}{R_{q_1} - R_{c_2}}$$

$$\theta_2 = \frac{L_2}{2 \cdot R_{c_2}} = \frac{L_s \cdot R_{q_1}}{2 \cdot R_{c_2} \cdot (R_{q_1} - R_{c_2})}$$

$$X_2 = L_2 \cdot \left( 1 - \frac{\theta_2^2}{10} + \frac{\theta_2^4}{216} - \dots \right)$$

$$Y_2 = L_2 \cdot \left( \frac{\theta_2}{3} - \frac{\theta_2^3}{42} + \frac{\theta_2^5}{1320} + \dots \right)$$

$$k_2 = X_2 - R_{c_2} \cdot \text{sen} \theta_2$$

$$p_2 = Y_2 - R_{c_2} \cdot (1 - \text{cos} \theta_2)$$

Sendo  $p_c$  o afastamento entre as duas curvas circulares, temos:

$$\theta_c = \arctan \left( \frac{k_2 - k_1}{(R_{q_1} + p_1) - (R_{c_2} + p_2)} \right)$$

$$\alpha = \theta_c - \theta_1$$

$$\beta = \theta_2 - \theta_c$$

$$\theta_s = \alpha + \beta$$

$$P_c = (R_{c_1} - R_{c_2}) - \frac{(R_{c_1} + P_1) - (R_{c_2} + P_2)}{\cos \theta_c}$$

## EXERCÍCIOS

Os exercícios assinalados com (\*) foram cedidos pelo professor Carlos Reynaldo Toledo Pimenta, da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

- Calcular as curvas de transição abaixo:
  - $E(PI) = 342 + 2,50$   $\Delta = 55^\circ$   $R_c = 680 \text{ m}$   $V = 80 \text{ km/h}$
  - $E(PI) = 1350 + 12,73$   $\Delta = 12^\circ$   $R_c = 2100 \text{ m}$   $V = 120 \text{ km/h}$
  - $E(PI) = 476 + 9,50$   $\Delta = 66^\circ 24'$   $R_c = 830 \text{ m}$   $V = 100 \text{ km/h}$
  - $E(PI) = 757 + 6,75$   $\Delta = 82^\circ$   $R_c = 600 \text{ m}$   $V = 70 \text{ km/h}$
- Construir as tabelas de locação do 1º ramo de transição das curvas da questão anterior.

- Numa curva de transição, para a determinação do comprimento de transição ( $L_t$ ) foi escolhido o valor  $J = 0,4 \text{ m/s}^3$  (variação da aceleração centrífuga por unidade de tempo). Calcular a estaca do ST. Dados:  $\Delta = 50^\circ$ ,  $R_c = 500 \text{ m}$ ,  $V_p = 100 \text{ km/h}$  e  $E(PI) = 210 + 0,00$ .
- Com relação ao exercício anterior, calcular as coordenadas  $X$  e  $Y$  da estaca 220+0,00.

- (\*) No traçado da figura, sendo  $V_p = 100 \text{ km/h}$ , verificar se é possível projetar a curva 2 de maneira que a variação da aceleração centrífuga por unidade de tempo ( $J$ ) seja a mesma para as duas curvas. Se não for possível, justificar. Dados:

Curva 1:  $E(PI_1) = 72 + 9,27$

$\Delta_1 = 11^\circ 36'$   $R_1 = 1000 \text{ m}$

$E(TS_1) = 65 + 15,26$

$E(SC_1) = 69 + 0,10$

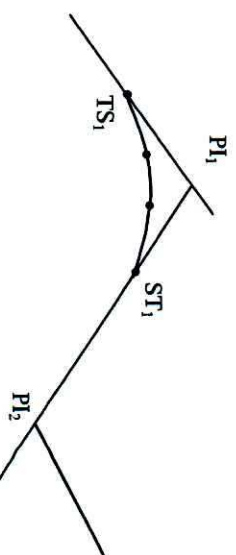
$E(CS_1) = 75 + 17,72$

$E(ST_1) = 79 + 2,56$

Curva 2:  $E(PI_2) = 91 + 10,00$

$R_2 = 600 \text{ m}$

$\Delta_2 = 40^\circ$



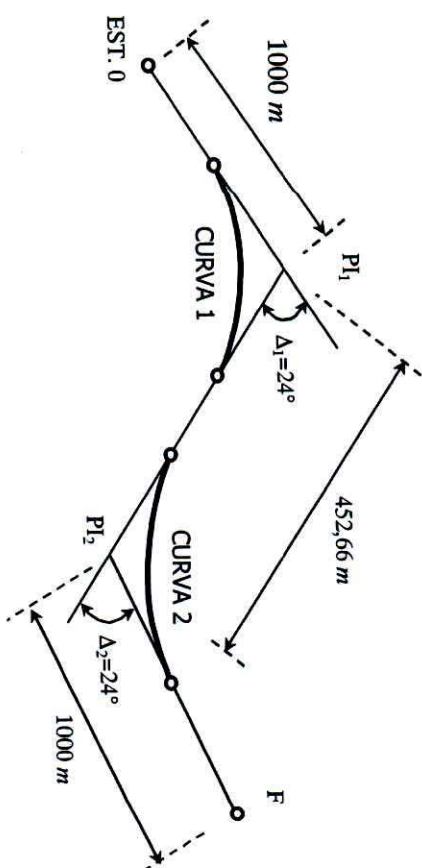
6. (\*) Numa curva onde a deflexão entre as tangentes ( $\Delta$ ) é igual a  $0,8$  radianos, calcular a velocidade, em  $km/h$ , que a curva permite desenvolver sem que a variação da aceleração centrífuga por unidade de tempo na transição ( $J$ ) ultrapasse o valor  $0,5 m/s^3$ . Dados:  $E(TS)=14+0,00$ ;  $E(SC)=18+0,00$ ;  $E(CS)=22+0,00$ ;  $E(ST)=26+0,00$ .

7. (\*) Numa curva horizontal, adotando-se o comprimento de transição ( $L_s$ ) igual à média entre o comprimento mínimo e o comprimento máximo possível, calcular:

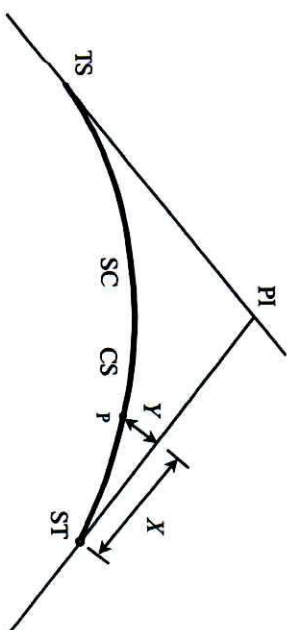
- a) a variação da aceleração centrífuga por unidade de tempo na transição.
- b) o afastamento necessário entre a curva circular e a tangente externa ( $p$ ).
- c) o comprimento do trecho circular da curva.

Dados:  $V_p = 80 km/h$ ;  $R_c = 210 m$ ;  $\Delta = 30^\circ$ .

8. (\*) Dado o alinhamento da figura, sendo o raio da curva 1 igual a  $500 m$  e fixada a velocidade de projeto  $V_p = 72 km/h$ , calcular as estacas dos pontos  $TS_1$ ,  $SC_1$ ,  $CS_1$ ,  $ST_1$ ,  $PC_2$ ,  $PT_2$  e estaca final do trecho, respeitando as seguintes condições: a) a curva 1 terá transições simétricas de comprimento  $L_s$ , calculado para uma variação de aceleração centrífuga por unidade de tempo  $J = 0,2 m/s^3$ ; b) a curva 2 será uma curva circular sem transições; c) entre o  $ST_1$  e o  $PC_2$  existe um trecho em tangente de comprimento  $200 m$ ; d) a curva 2 terá o maior raio possível, respeitadas as condições a, b e c.

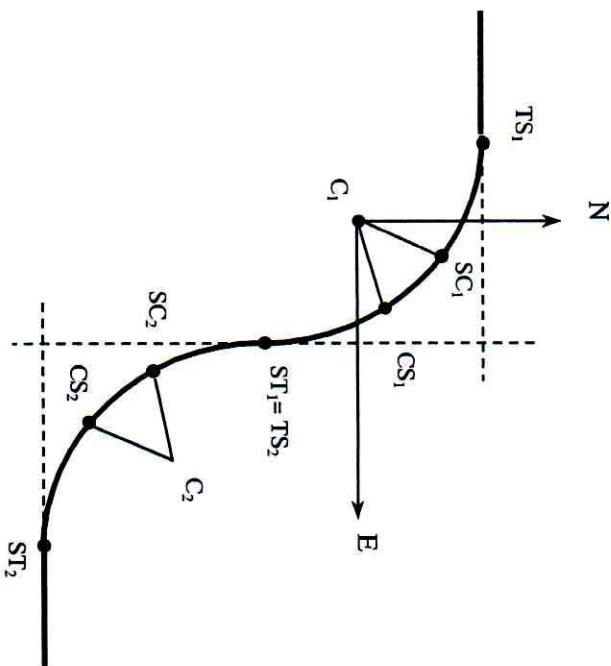


9. (\*) Dada a curva horizontal da figura, calcular os valores de  $X$  e  $Y$  do ponto  $P$  que está na estaca  $100 + 0,00$ . Dados:  $R_c = 350 m$ ,  $E(PI) = 90 + 15,00$ ,  $L_s = 150 m$  e  $\Delta = 60^\circ$ .

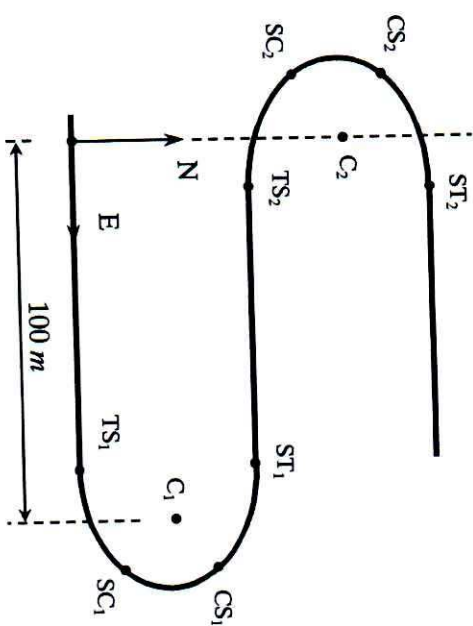


10. (\*) Deseja-se projetar uma curva de transição com  $J = 0,4 m/s^3$ . Calcular a deflexão que deve ser dada no aparelho (colocado sobre o TS) para locar a estaca 200. Dados:  $V_p = 100 km/h$ ,  $\Delta = 40^\circ$ ,  $R_c = 600 m$ ,  $E(PI) = 209 + 3,23$ .

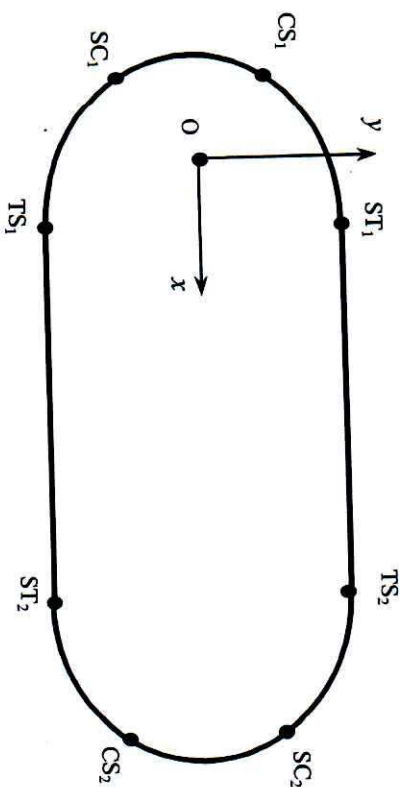
11. (\*) A figura mostra trecho de uma via contendo tangentes perpendiculares entre si e duas curvas circulares com transição, reversas e consecutivas. Dados  $R_c = 200\text{ m}$  e  $L_s = 80\text{ m}$ , calcular as coordenadas do ponto  $ST_2$  em relação ao sistema de coordenadas dado.



12. (\*) A figura mostra trecho do eixo da planta de um autódromo formado por 3 tangentes paralelas concordadas entre si por curvas circulares com transição. Sabendo que  $R_c = 50\text{ m}$  e  $L_s = 50\text{ m}$ , calcular as coordenadas do ponto  $ST_2$  em relação ao sistema de coordenadas dado.



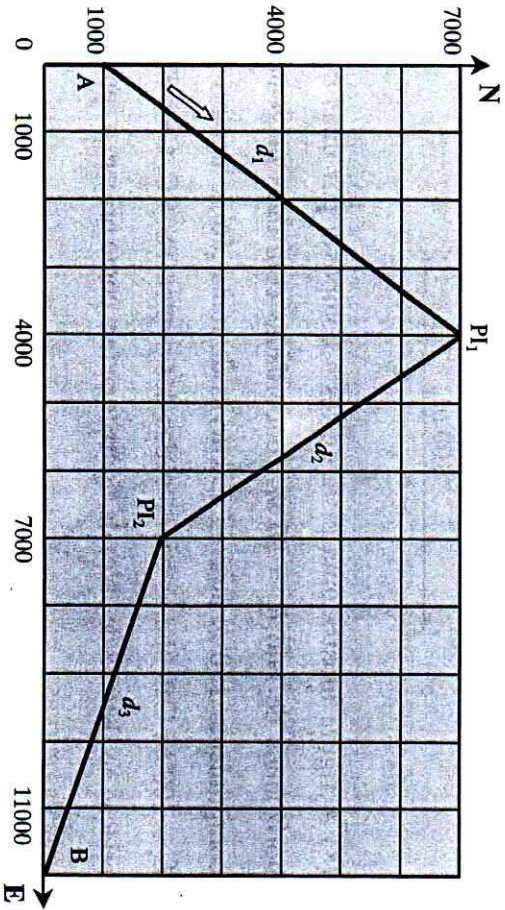
13. (\*) A figura mostra uma pista de teste composta por duas curvas horizontais de raio  $R_c = 80\text{ m}$ , concordadas com duas tangentes de comprimento  $150\text{ m}$  através de curvas de transição de comprimento  $L_s = 100\text{ m}$ . Calcular as coordenadas dos pontos TS, SC, CS e ST em relação ao sistema de eixos da figura, que tem como origem o centro de uma das curvas.





14. Calcular as estacas dos pontos notáveis das curvas e a estaca final do traçado (ponto B), sendo dados:

- a) Estaca inicial do traçado (ponto A) = 0 + 0,00
- b) Raio da curva 1 = 300 m (transição)
- c) Raio da curva 2 = 600 m (transição)
- d)  $V_p = 80 \text{ km/h}$



## SUPERELEVÇÃO

### CAPÍTULO 6

*"Um professor não educa indivíduos. Ele educa uma espécie."*

**GEORG LICHTENBERG**  
Físico alemão

### INTRODUÇÃO

Superelevação é a inclinação transversal necessária nas curvas a fim de combater a força centrífuga desenvolvida nos veículos e dificultar a derrapagem. Ela é função do raio de curvatura e da velocidade do veículo.

Para cada velocidade  $V$ , o raio  $R$ , a superelevação  $e$ , bem como o coeficiente de atrito transversal  $f$  constituem um conjunto de valores inter-relacionados, cuja vinculação é expressa pela fórmula abaixo:

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

(6.1)

Fazendo  $1/R = C$  (curvatura), a equação 6.1 se reduz a:

$$e = \frac{V^2}{127} \cdot C - f \quad (6.2)$$

Dada uma velocidade  $V$  e escolhido um raio  $R$  (ou uma curvatura  $C$ ), o valor para a superelevação  $e$  deverá estar compreendido entre os seguintes valores, onde  $e_{\max} > e_1 > e_2 > 0$ :

$$e_1 = \frac{V^2}{127} \cdot C \quad f = 0; \text{ o veículo é equilibrado exclusivamente pelo efeito da superelevação.}$$

$$e_1 = \frac{V^2}{127} \cdot C - f_{\max} \quad f = f_{\max}; \text{ o veículo é equilibrado com a contribuição de todo o atrito lateral possível.}$$

Plotando-se os valores da superelevação ( $e$ ) em função da curvatura ( $C$ ) em um gráfico, podemos observar que os valores de  $e$  que satisfazem a equação 6.2 se encontram num paralelogramo definido pelas linhas correspondentes aos valores  $e = 0$ ,  $e = e_{\max}$ ,  $f = 0$  e  $f = f_{\max}$ . Qualquer valor da superelevação que esteja no interior do paralelogramo atende às exigências mínimas de estabilidade dos veículos na curva.

Para a escolha da melhor superelevação para cada curva deve-se, então, levar em conta o fator conforto, ou seja, definir dentro do paralelogramo a curva de conforto máximo.

Basicamente, existem 5 métodos (figuras 6.1a e 6.1b):

1. Escolha do valor da superelevação diretamente proporcional à curvatura  $C$  (Método de La Torre).
2. Escolha de um valor tal que um veículo trafegando na velocidade de projeto tenha toda a força centrífuga compensada pela superelevação ( $f = 0$ ).
3. O critério 2, usando-se a velocidade de operação no lugar da velocidade de projeto (Método de Barnett).
4. Escolha de um valor para a superelevação numa relação não linear entre os valores compreendidos entre os valores dos critérios 1 e 2 (Método da AASHTO).
5. Escolha de um valor tal que o veículo é equilibrado com a contribuição de todo o atrito lateral possível ( $f = f_{\max}$ ).

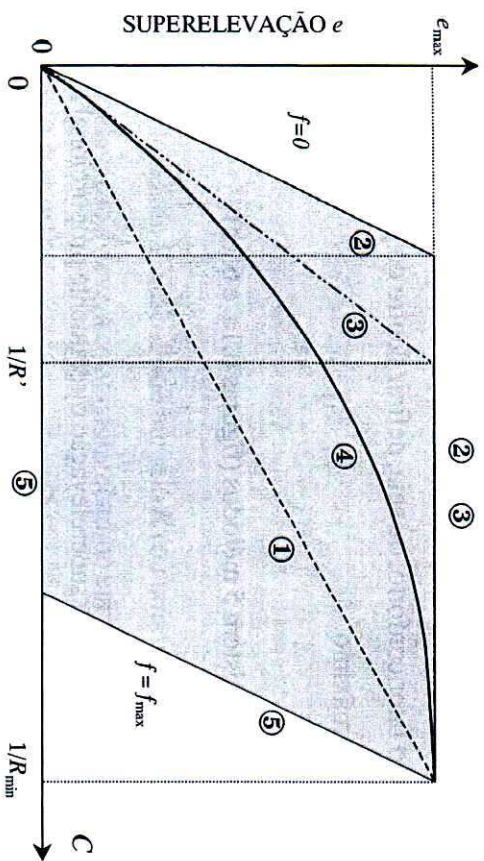


FIGURA 6.1a – Valores possíveis de  $e$ , em função da estabilidade (Fonte: AASHTO).

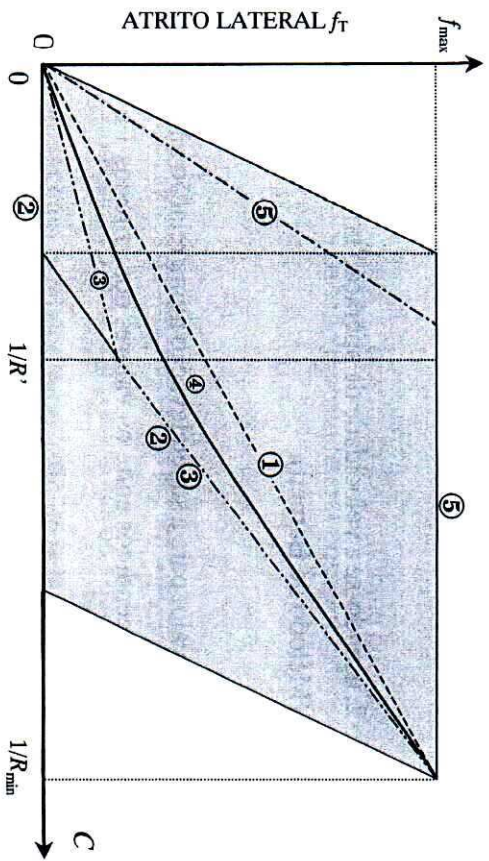


FIGURA 6.1b – Variação do atrito  $f_T$  em função da curvatura, para  $V = V_{projeto}$  (Fonte: AASHTO).

Das figuras 6.1a e 6.1b, percebe-se que:

- No processo 1 a variação da superelevação é linear com o inverso do raio da curva.
- No processo 5, o atrito lateral responde integralmente pela estabilidade do veículo nas curvas de maior raio, até o limite de  $f_{max}$ . A partir daí, a estabilidade é obtida somando-se a contribuição da superelevação, na região das curvas de menor raio.
- No processo 2 há uma inversão da situação descrita para o processo 5.
- O processo 3 é semelhante ao processo 2, apenas com a velocidade de projeto sendo substituída pela velocidade de operação.
- No processo 4 há uma variação curvilínea de  $e$  e  $f$  com o inverso do raio de curva, situando-se entre os processos 1 e 2.

Analisando os tópicos acima, temos:

O processo 1 seria ideal se todos os veículos trafegassem a uma velocidade constante.

O processo 5 se aplica a vias urbanas de baixa velocidade, onde as restrições laterais limitam o uso da superelevação.

No processo 2, para veículos trafegando com a velocidade de operação, o coeficiente de atrito lateral torna-se negativo.

O processo 3 procura minimizar as desvantagens do anterior, limitando-as a um número menor de curvas.

O processo 1 garante que uma vasta gama de curvas deixará de utilizar da máxima superelevação possível.

O processo 4 combina os dois últimos requisitos citados. Para contrabalançar a tendência de aumento de velocidade nas curvas de raios mais amplos é desejável que a superelevação aproxime-se daquela obtida por este processo.

### TAXAS DE SUPERELEVAÇÃO PARA RAIOS ACIMA DOS MÍNIMOS

Um estudo feito com várias curvas compreendidas no paralelogramo da figura 6.1a, levou a AASHTO a optar pela forma parabólica para a distribuição da superelevação, aconselhando o uso de uma curva intermediária entre as curvas dos processos 1 e 2.

Da figura 6.2, temos o seguinte:

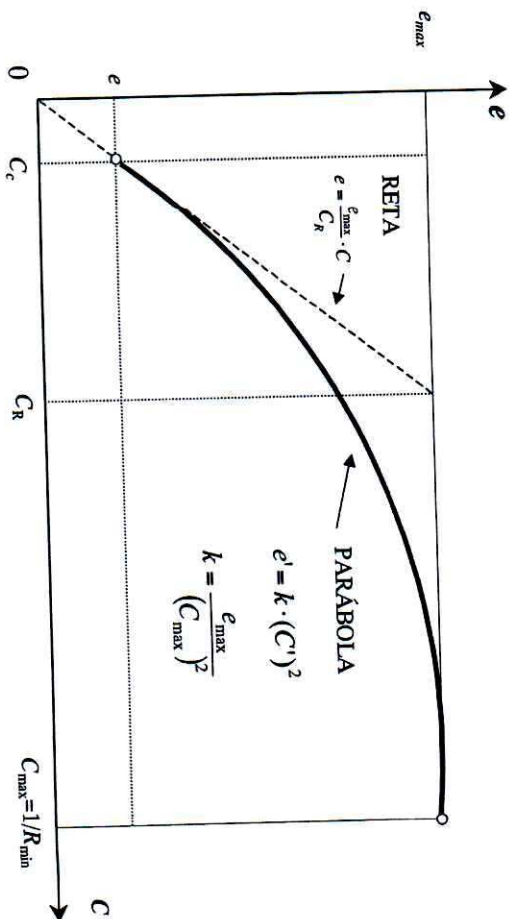


FIGURA 6.2 – Distribuição parabólica da superelevação.

$$e_{\max} - e = k \cdot (C_{\max} - C)^2$$

$$e_{\max} - e = \frac{e_{\max}}{(C_{\max})^2} \cdot (C_{\max} - C)^2$$

$$\frac{e_{\max} - e}{e_{\max}} = \left( \frac{C_{\max} - C}{C_{\max}} \right)^2$$

$$1 - \frac{e}{e_{\max}} = \left( 1 - \frac{C}{C_{\max}} \right)^2 = \left( 1 - \frac{R_{\min}}{R} \right)^2$$

$$e = e_{\max} \cdot \left( \frac{2R_{\min}}{R} - \frac{R_{\min}^2}{R^2} \right)$$

(6.3)

A fórmula 6.3, representada graficamente nas figuras 6.3 a 6.7, é adotada pelo DNER para o cálculo da taxa de superelevação para raios acima dos mínimos. Neste gráfico, a partir da situação correspondente ao raio mínimo (ponto A), tanto as taxas de superelevação  $e$  como os coeficientes de atrito transversal  $f$  decrescem gradual e simultaneamente (trecho I da figura), até o valor do raio  $R_1$ , onde é atingida e mantida a taxa mínima de superelevação admissível. Esse decréscimo é realizado segundo uma relação curvilínea entre os raios de curvatura e as taxas de superelevação. A partir desse valor de  $e_{\min}$ , então, iria se reduzindo o atrito transversal (trecho II).

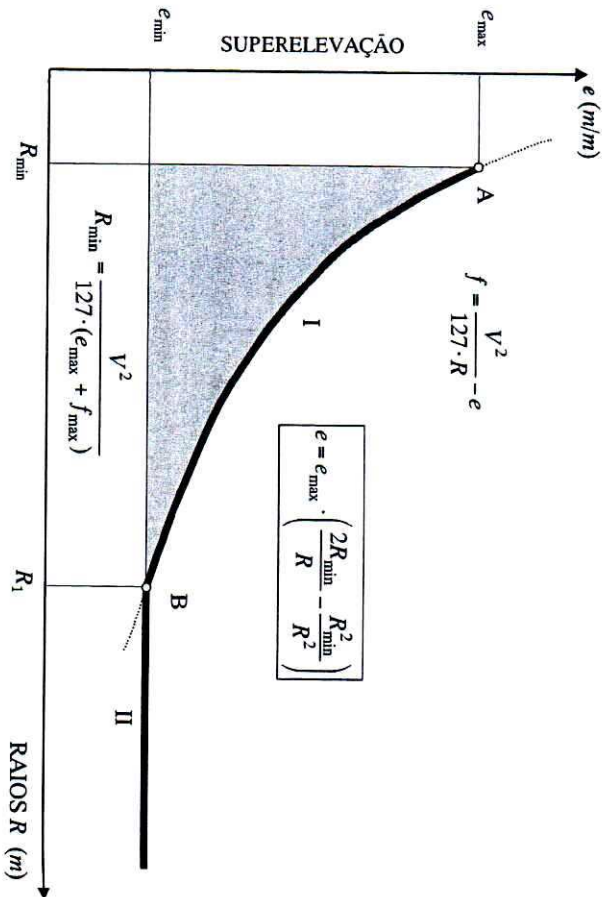


FIGURA 6.3 – Superelevações para raios acima dos mínimos (DNER).

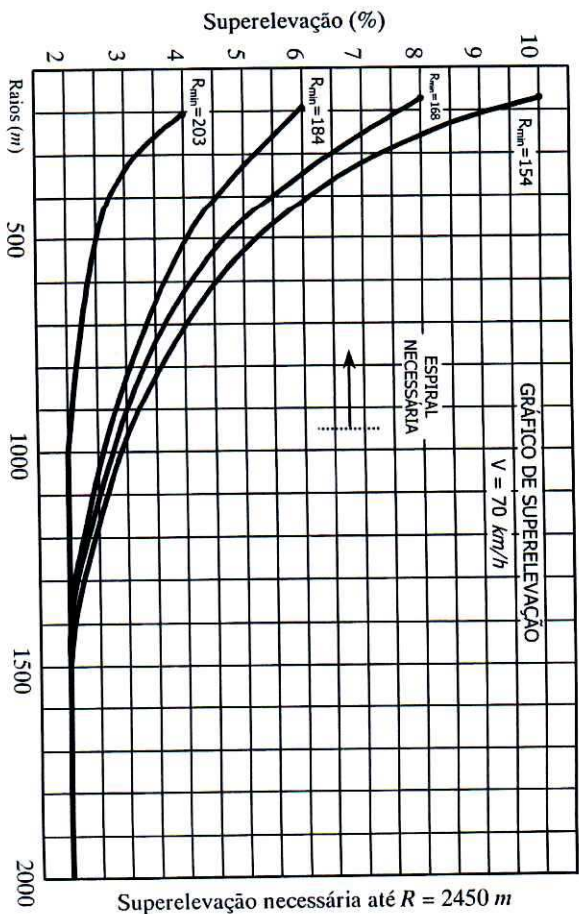


FIGURA 6.4 – Gráfico de superelevação ( $V = 70 \text{ km/h}$ ).

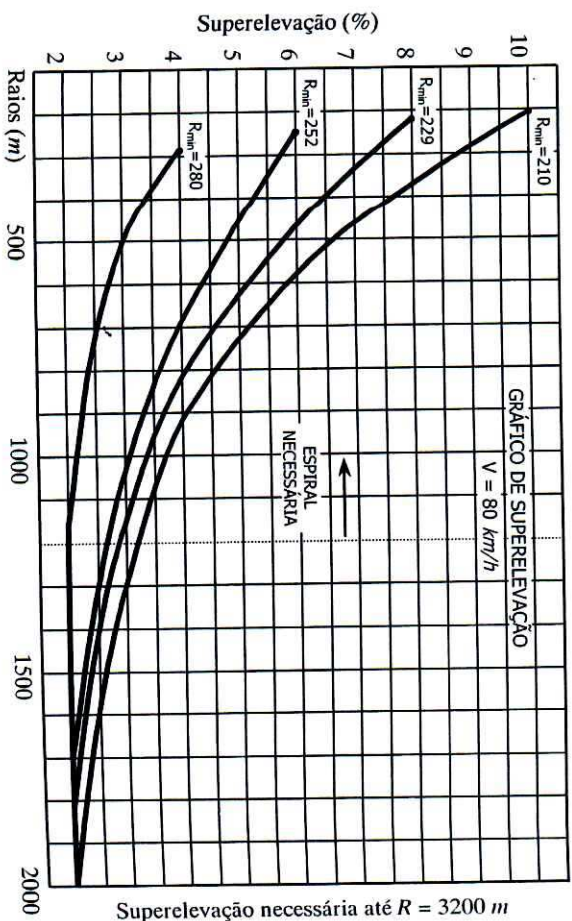


FIGURA 6.5 – Gráfico de superelevação ( $V = 80 \text{ km/h}$ ).

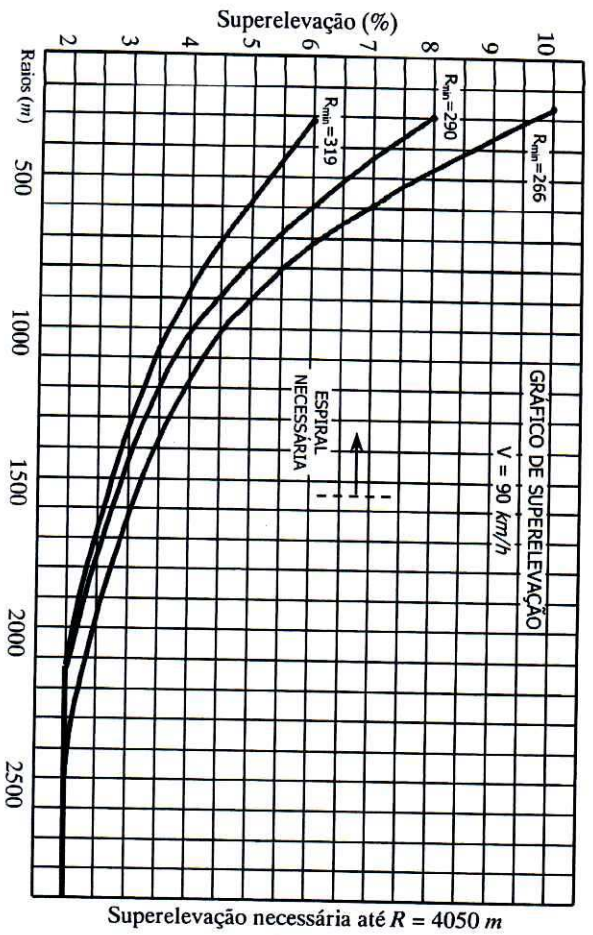


FIGURA 6.6 – Gráfico de superelevação ( $V = 90 \text{ km/h}$ ).

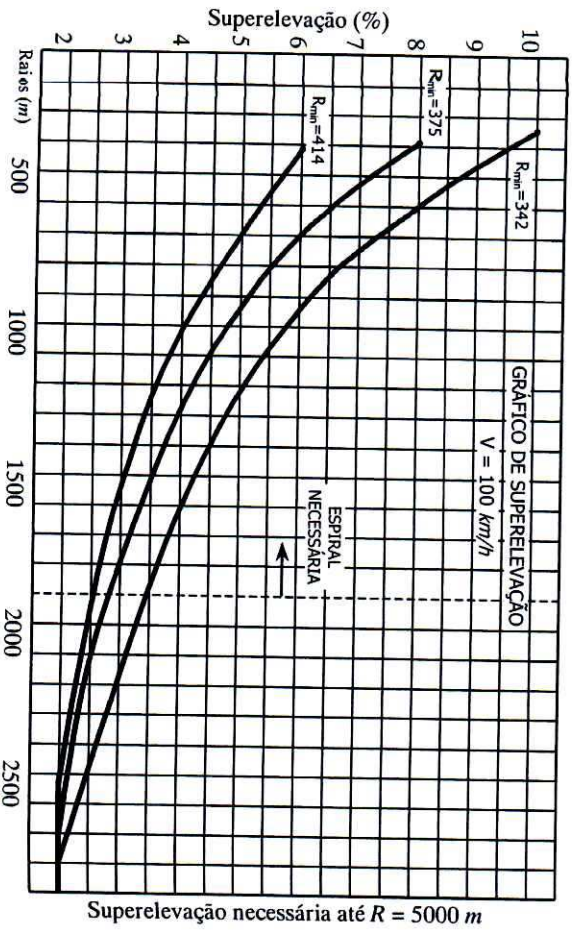


FIGURA 6.7 – Gráfico de superelevação ( $V = 100 \text{ km/h}$ ).

Para curvas com grandes raios, a superelevação é desnecessária. Adotando-se para estes 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 acima dos quais a superelevação pode ser dispensada encontra-se resumido na tabela 6.1. Foi considerada em seu cálculo uma superelevação negativa de 2% para os veículos que percorrem o lado externo da curva, mas são adequados também para pistas com abaulamentos diferentes.

TABELA 6.1 – Valores dos raios acima dos quais a superelevação é dispensável.

| $V \text{ (km/h)}$ | 30  | 40  | 50   | 60   | 70   | 80   | 90   | $\geq 100$ |
|--------------------|-----|-----|------|------|------|------|------|------------|
| $R \text{ (m)}$    | 450 | 800 | 1250 | 1800 | 2450 | 3200 | 4050 | 5000       |

Fonte: DNER

**EXEMPLO 1:** Numa rodovia de Classe I, temos:  $e_{\max} = 10\%$ ,  $V = 90 \text{ km/h}$ . Se uma curva nesta rodovia tem raio de 900 metros, calcular a superelevação a ser adotada.

**Solução:** Da tabela 4.2, obtemos  $f_{\max} = 0,14$  para  $V = 90 \text{ km/h}$ . Logo:

$$R_{\min} = \frac{V^2}{127 \cdot (e_{\max} + f_{\max})} = \frac{90^2}{127 \cdot (0,10 + 0,14)} = 265,75 \text{ m}$$

$$e = e_{\max} \cdot \left( \frac{2R_{\min}}{R} - \frac{R_{\min}^2}{R^2} \right) = 0,10 \cdot \left( 2 \cdot \frac{265,75}{900} - \frac{265,75^2}{900^2} \right) = 0,050 = 5,0\%$$

## DISTRIBUIÇÃO DA SUPERELEVÇÃO

*Distribuição da Super elevação* é o processo de variação da seção transversal da estrada entre a seção normal (adotada nos trechos em tangente) e a seção superelevada (adotada nas curvas). A variação da inclinação transversal necessária à obtenção da super elevação nas curvas horizontais deve ser feita de forma a evitar variações bruscas dos perfis das bordas da pista.

Vários processos podem ser utilizados para a distribuição da super elevação.

Os mais utilizados são baseados na posição do centro de giro do pavimento, e são os seguintes (figura 6.8):

- Giro em torno do eixo da pista (A).
- Giro em torno da borda interna da pista (B).
- Giro em torno da borda externa da pista (C).

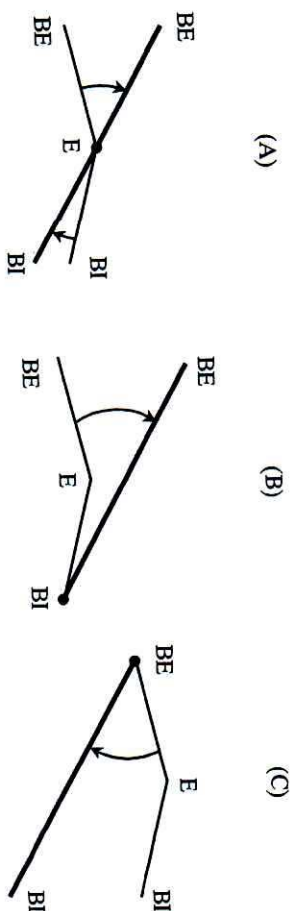


FIGURA 6.8 – Processos de obtenção da super elevação.

No caso mais usual de pistas simples de mão dupla com eixo no centro e seção transversal abaulada, o eixo de rotação geralmente coincidirá com o eixo do projeto. Nessa hipótese, são obtidas as menores rampas de super elevação e as variações alométricas são também distribuídas de forma simétrica.

O processo do giro em torno do eixo é mais usado porque acarreta menores alterações das cotas do pavimento em relação ao perfil de referência, resultando numa distorção menor do pavimento.

A adoção da borda da pista do lado interno da curva como eixo de rotação é justificada onde houver risco de problemas de drenagem devido ao abaixamento da borda interna. O processo do giro em torno da borda externa da pista favorece a aparência e a estética, ao evitar a elevação dessa borda, normalmente a mais perceptível pelo motorista.

Nos 3 processos, o giro do pavimento para a obtenção da superelevação  $e\%$  é feito de forma que tanto as bordas como o eixo tenham uma variação linear.

Essas variações de cotas das bordas e eixo em relação ao perfil de referência estão sujeitas a valores máximos recomendados, pois a variação da superelevação deve ser feita de forma segura e confortável.

Como nos trechos em tangente a estrada geralmente possui inclinação transversal simétrica em relação ao eixo de  $a\%$ , o processo de distribuição da superelevação pode ser dividido em duas etapas, como mostra a figura 6.9:

- 1ª ETAPA: eliminação da superelevação negativa.
- 2ª ETAPA: obtenção da superelevação  $e\%$  do trecho circular.

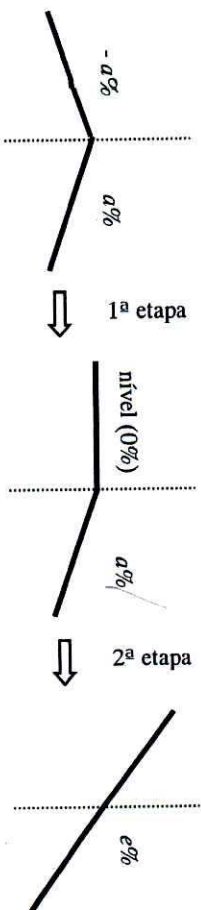


FIGURA 6.9 – Seções transversais de uma estrada.

No caso comum quando o trecho circular é sucedido por curvas de transição, a variação da superelevação (2ª etapa) deverá ser feita dentro da curva de transição. Neste caso, o comprimento de transição  $L_s$  define o comprimento do trecho de variação da superelevação ( $L_c$ ), e portanto a inclinação longitudinal  $\alpha_2$ . Para a 1ª etapa, o comprimento  $L_1$  é definido em função do valor da inclinação  $\alpha_1$ . Os dois processos mais usados são:

- AASHTO:  $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha^1$  (valores máximos - tabela 6.2)
- BARNETT:  $\alpha_1 = 0,25\%$  (1:400)<sup>2</sup> e  $\alpha_2 = 0,5\%$  (1:200) (valores máximos).

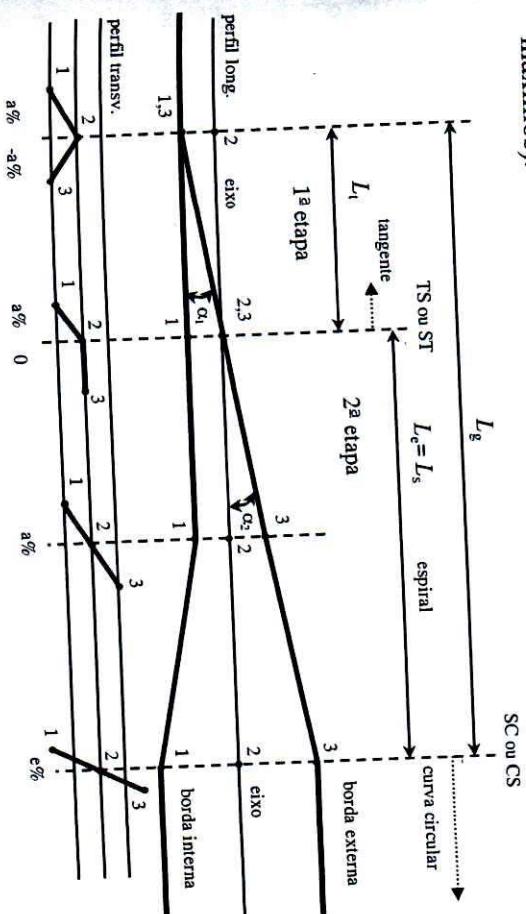


FIGURA 6.10 – Giro em torno do eixo.

<sup>1</sup> De acordo com o professor Creso Peixoto, ao adotar  $L_c = L_s$ , deve ser calculado o novo valor de  $\alpha_2$  (ou de  $\alpha_1$ ), que deverá ser menor ou igual a  $0,5\%$  (BARNETT), e menor ou igual ao valor pelo método da AASHTO.

<sup>2</sup> Verificada a nota 1, o valor de  $\alpha_1$  pelo critério de BARNETT conserva-se, mas não deverá ser maior que o valor de  $\alpha_2$  (quando  $\alpha_2 \leq 0,25\% \rightarrow \alpha_1 = \alpha_2$ ).



A variação da superelevação deverá ser feita em um trecho de comprimento nunca inferior ao mínimo estipulado pela tabela 6.2, recomendados pela AASHTO.

Esta tabela deve ser usada nos casos em que o valor de  $L_c$  esteja abaixo da linha cheia. Caso contrário, adotar os valores da linha  $L_{e_{\min}}$ , que correspondem ao espaço percorrido por um veículo, durante 2 segundos, à velocidade de projeto. Quando o valor de  $L_{e_{\min}}$  for menor que o comprimento de transição  $L_s$ , adota-se  $L_c = L_s$ . Caso contrário, deve-se analisar a possibilidade de aumentar o comprimento  $L_s$  para o valor  $L'_s = L_c \geq L_{e_{\min}}$ .

Quando a curva horizontal é circular simples, a variação da superelevação poderá ser feita parte no trecho em tangente e parte no trecho circular, ou mesmo toda a variação no trecho em tangente de forma que no trecho circular a superelevação seja constante. A escolha da melhor posição depende da análise de cada caso.

Considerando-se o número infinito de disposições do perfil e a necessidade de se levar em conta os problemas de drenagem, greides críticos, estética da estrada, etc., a adoção generalizada de qualquer dos métodos não é aconselhável. Cada trecho de variação da superelevação deve ser considerado como um problema individual.

TABELA 6.2 – Comprimentos mínimos dos trechos de variação da superelevação (pista única, 2 faixas de tráfego de 3,6 m).

| SUPER-ELEVÇÃO<br>$e$ (%)      | VELOCIDADE (km/h)    |      |      |      |      |      |      |      |  |  |
|-------------------------------|----------------------|------|------|------|------|------|------|------|--|--|
|                               | 50                   | 60   | 70   | 80   | 90   | 100  | 110  | 120  |  |  |
|                               | $\alpha$ (%)         |      |      |      |      |      |      |      |  |  |
|                               | 0,66                 | 0,60 | 0,54 | 0,50 | 0,47 | 0,43 | 0,40 | 0,37 |  |  |
|                               | VALORES DE $L_c$ (m) |      |      |      |      |      |      |      |  |  |
| 2                             | 11                   | 12   | 13   | 14   | 15   | 17   | 18   | 19   |  |  |
| 4                             | 22                   | 24   | 27   | 29   | 31   | 33   | 36   | 39   |  |  |
| 6                             | 33                   | 36   | 40   | 43   | 46   | 50   | 54   | 58   |  |  |
| 8                             | 44                   | 48   | 53   | 58   | 61   | 67   | 72   | 78   |  |  |
| 10                            | 55                   | 60   | 67   | 72   | 77   | 84   | 90   | 97   |  |  |
| 12                            | 65                   | 72   | 80   | 86   | 92   | 100  | 108  | 117  |  |  |
| $L_{e_{\min}} = 0,56 \cdot V$ | 28                   | 33   | 39   | 44   | 50   | 56   | 61   | 67   |  |  |

Fonte: AASHTO

Para pistas com número de faixas maior que 2, a AASHTO recomenda os seguintes valores:

3 faixas:  $L'_c = 1,2L_c$

4 faixas:  $L'_c = 1,5L_c$

6 faixas:  $L'_c = 2,0L_c$

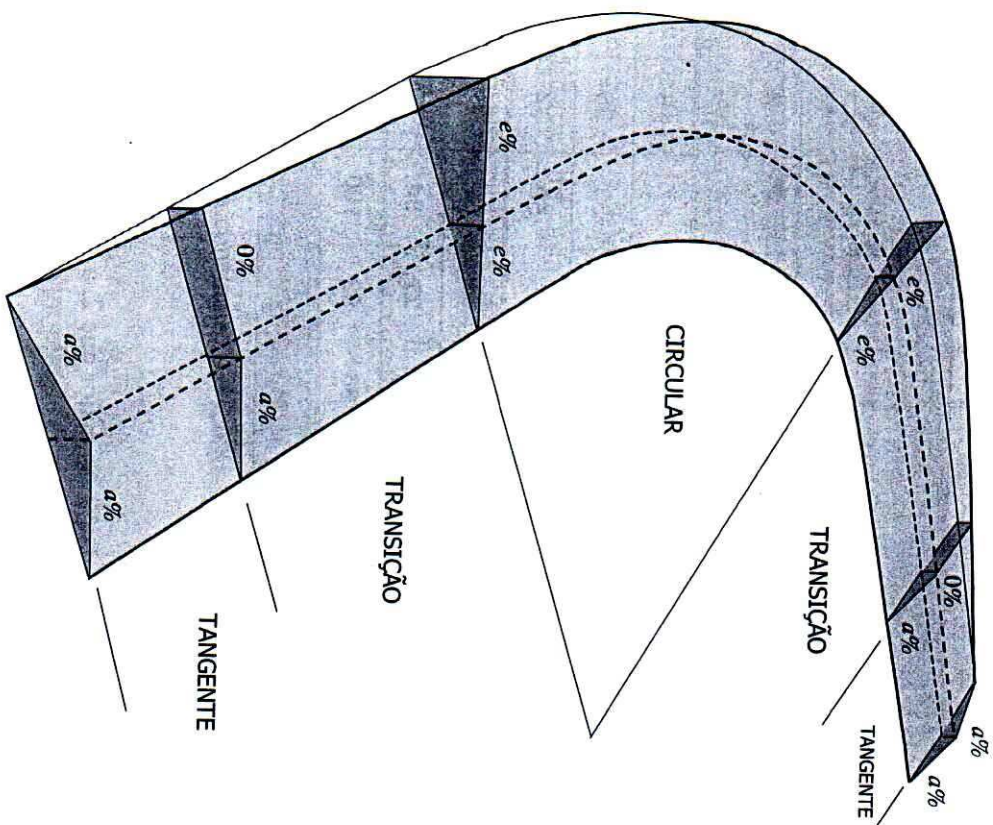


FIGURA 6.11 – Esquema mostrando a variação da superelevação.

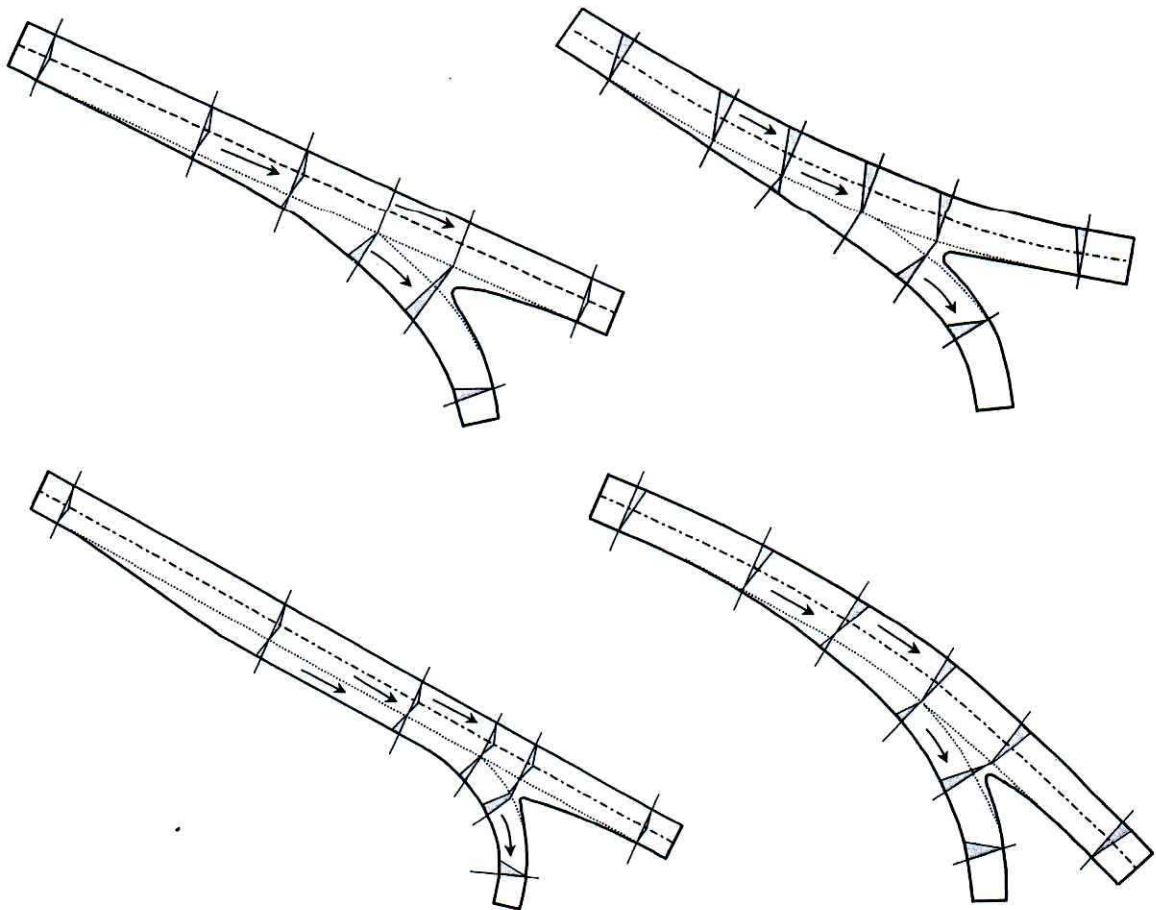
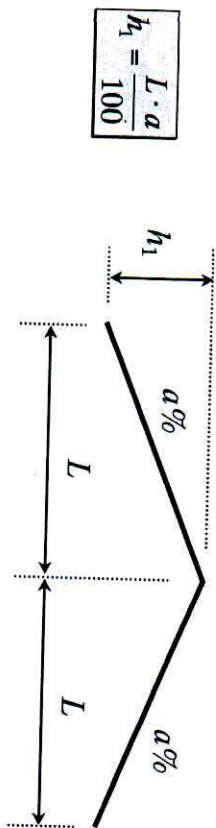


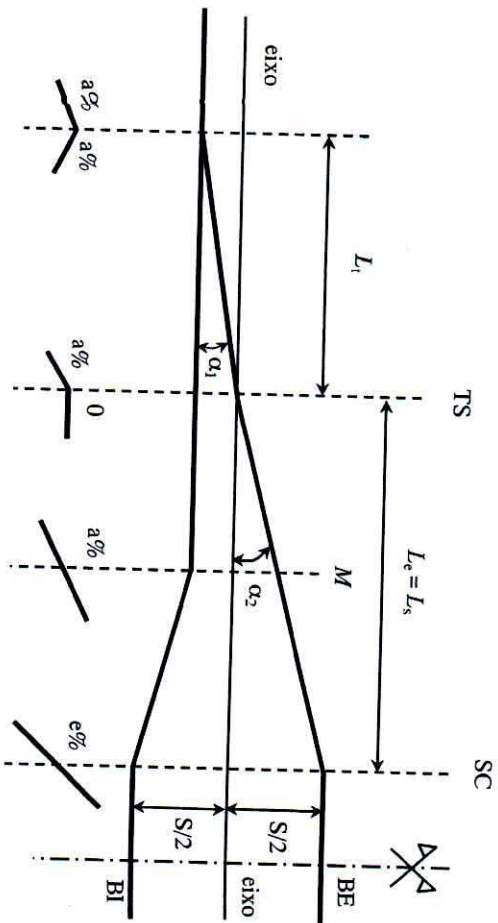
FIGURA 6.12 – Distribuição da superelevação em bifurcações  
(Fonte: CARCIENTE).

### DIAGRAMAS DE SUPERELEVÇÃO



$$h_1 = \frac{L \cdot a}{100}$$

#### 1) Giro em torno do eixo



$$\frac{S}{2} = \frac{L \cdot e}{100}$$

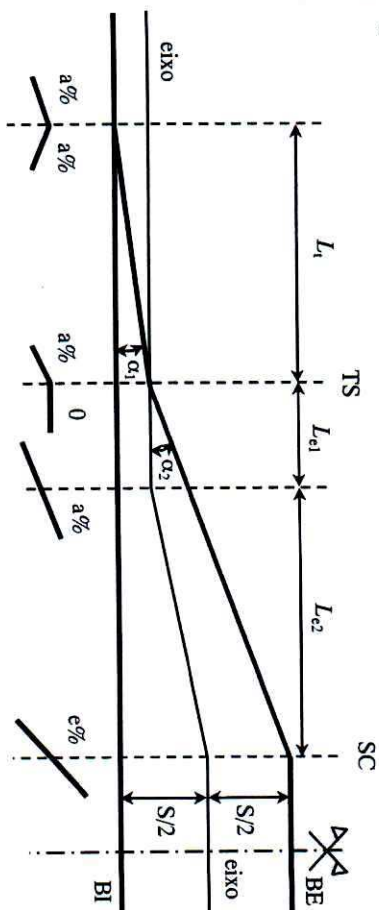
$$L_1 = \frac{100 \cdot h_1}{\alpha_1}$$

$$L_{e1} = \frac{100 \cdot h_1}{\alpha_2}$$

$$L_{e2} = \frac{100 \cdot (S - 2 \cdot h_1)}{2 \cdot \alpha_2}$$

$$L_e = L_{e1} + L_{e2}$$

#### 2) Giro em torno da borda interna



$$L_1 = \frac{100 \cdot h_1}{\alpha_1}$$

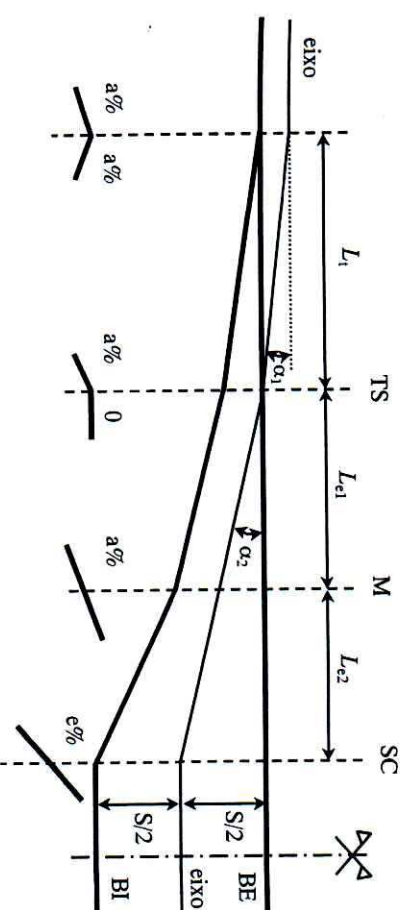
$$S = \frac{2 \cdot L \cdot e}{100}$$

$$L_{e1} = \frac{100 \cdot h_1}{\alpha_2}$$

$$L_{e2} = \frac{100 \cdot (S - 2 \cdot h_1)}{2 \cdot \alpha_2}$$

$$L_e = L_{e1} + L_{e2}$$

#### 3) Giro em torno da borda externa



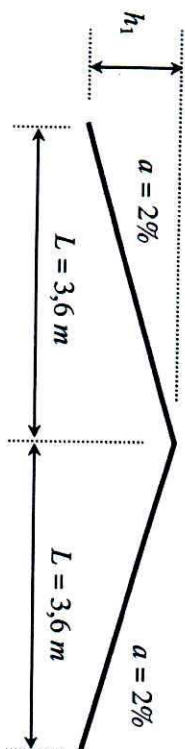
$$L_1 = \frac{100 \cdot h_1}{\alpha_1}$$

$$S = \frac{2 \cdot L \cdot e}{100}$$

$$L_{e1} = \frac{100 \cdot h_1}{\alpha_2}$$

$$L_{e2} = \frac{100 \cdot (S - 2 \cdot h_1)}{2 \cdot \alpha_2}$$

**EXEMPLO 2:** Confeccionar o diagrama de superelevação de uma curva de transição pelo método de BARNETT, dados  $e = 10\%$  e  $L_e = L_s$ . Adotar giro em torno do eixo e seção transversal dada na figura (extraído das notas de aula do professor Creso Peixoto).



**Solução:**

Critério de BARNETT:

$$\alpha_1 = 0,25\% (1:400) \text{ e } \alpha_2 = 0,5\% (1:200)$$

Eliminação da superelevação negativa

(comprimento de giro em tangente):

$$h_1 = \frac{L \cdot a}{100} = \frac{3,6 \cdot (2)}{100} = 0,072 \text{ m}$$

$$L_{t_1} = \frac{100 \cdot h_1}{\alpha_1} = \frac{100 \cdot (0,072)}{0,25} = 28,8 \text{ m}$$

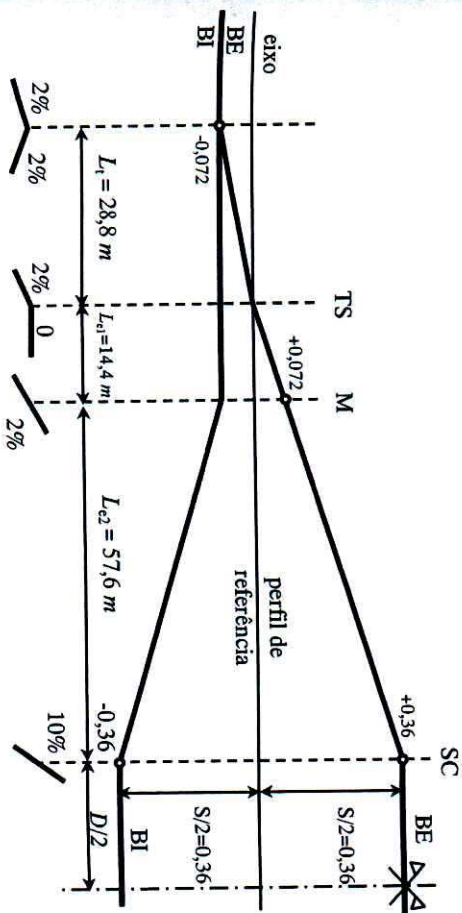
Comprimento do giro em curva:

$$L_{e_1} = \frac{100 \cdot h_1}{\alpha_2} = \frac{100 \cdot 0,072}{0,5} = 14,4 \text{ m}$$

$$S = \frac{2 \cdot L \cdot e}{100} = \frac{2 \cdot 3,6 \cdot 10}{100} = 0,72 \text{ m}$$

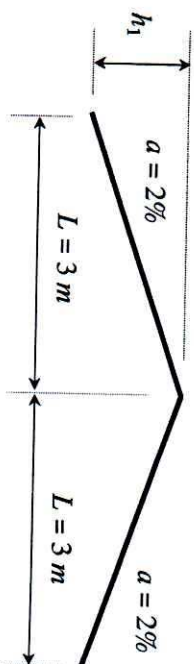
$$L_{e_2} = \frac{100 \cdot (S - 2 \cdot h_1)}{2 \cdot \alpha_2} = \frac{100 \cdot [0,72 - 2 \cdot (0,072)]}{2 \cdot (0,5)} = 57,6 \text{ m}$$

$$L_e = L_{e_1} + L_{e_2} = 14,4 + 57,6 = 72 \text{ m}$$



## EXERCÍCIOS

1. Numa rodovia de Classe I, temos:  $e_{\max} = 8\%$ ,  $V = 100 \text{ km/h}$ . Se uma curva nesta rodovia tem raio de 600 metros, calcular a superelevação a ser adotada, segundo o DNER.
2. Numa rodovia de Classe II, temos:  $e_{\max} = 6\%$ ,  $V = 80 \text{ km/h}$ . Se uma curva nesta rodovia tem raio de 400 metros, calcular a superelevação a ser adotada, segundo o DNER.
3. Fazer o diagrama da superelevação de uma curva de transição em espiral, anotando todas as cotas e pontos em relação ao perfil de referência (extraído das notas de aula do professor Creso Peixoto). Dados:



$E(TS) = 40 + 2,00$   
 Considerar  $L_s = L_e$   
 $e = 8\%$

Método de giro em torno da borda interna (BI)

Critério de cálculo: BARNETT ( $\alpha_1 = 0,25\%$  e  $\alpha_2 = 0,50\%$ )

## CAPÍTULO 7

# SUPERLARGURA

*"Um professor sempre age a crenidade.  
 Ele nunca saberá onde sua influência termina."*

**HENRY ADAMS**

Historiador americano

## INTRODUÇÃO

Superlargura é o aumento de largura necessário nas curvas para a perfeita inscrição dos veículos. Quando um veículo percorre uma curva e o ângulo de ataque de suas rodas diretrizes é constante, a trajetória de cada ponto do veículo é circular. O anel circular formado pelas trajetórias dos diversos pontos do veículo é mais largo que o gabarito transversal do veículo em linha reta.

Para compensar esse aumento de largura, à largura padrão das pistas é acrescentado o valor  $S$  (superlargura) nos trechos em curva.

## CÁLCULO DA SUPERLARGURA

Segundo o DNER, a superlargura é obtida calculando a largura total da pista necessária no trecho curvo, para o veículo de projeto adotado (geralmente o veículo CO), deduzindo a largura básica estabelecida para a pista em tangente, segundo a seguinte fórmula:

$$S = L_T - L_B$$

(7.1)

$$L_T = 2 \cdot (G_C + G_L) + G_F + F_D$$

(7.2)

onde:

$S$  = superlargura total da pista.

$L_T$  = largura total em curva da pista de 2 faixas de tráfego.

$L_B$  = largura básica da pista em tangente.

$G_C$  = gabarito estático do veículo em curva.

$G_L$  = folga lateral do veículo em movimento.

$G_F$  = acréscimo devido ao balanço dianteiro do veículo em curva.

$F_D$  = folga dinâmica, determinada de forma experimental e empírica.

A figura a seguir representa a trajetória de um veículo numa curva.

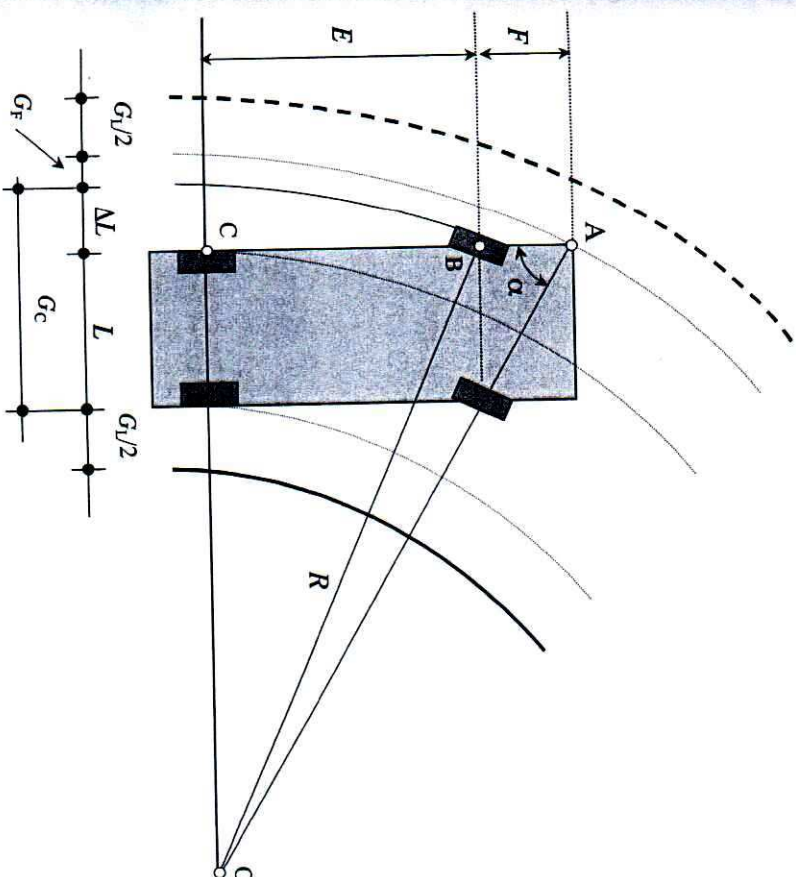


FIGURA 7.1 – Trajetória de um veículo numa curva.

No triângulo BCO da figura 7.1, temos:

$$R^2 = E^2 + (R - \Delta L)^2$$

$$\Delta L = R - \sqrt{R^2 - E^2}$$

(7.3)

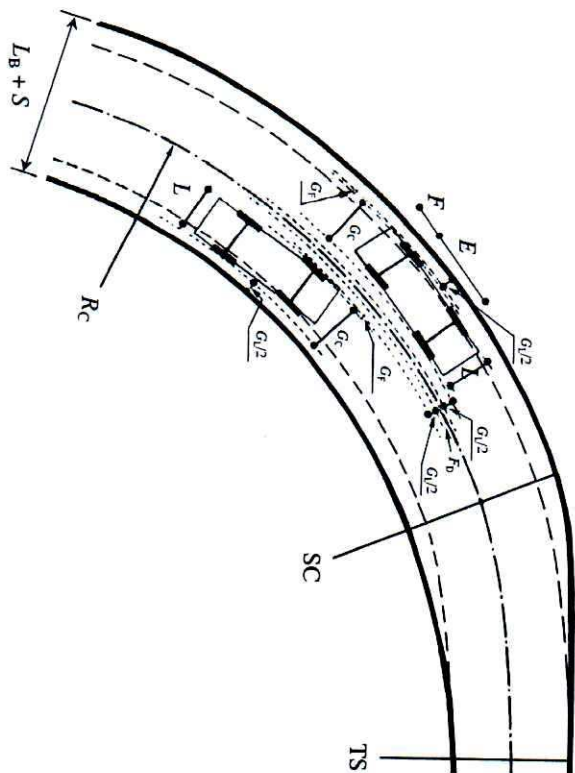


FIGURA 7.2 – Elementos intervenientes no cálculo da superlargura

(Fonte: DNER).

Logo, a expressão para cálculo do termo  $G_c$  é:

$$G_c = L + \Delta L$$

$$G_c = L + \left( R - \sqrt{R^2 - E^2} \right) \quad (7.4)$$

sendo  $\Delta L$  o acréscimo devido à diferença na trajetória da rodas dianteiras e traseiras. A expressão entre parênteses fornece valores muito semelhantes aos da expressão  $E^2/2R$ . Desta maneira, a equação 7.4 resulta em:

$$G_c = L + \frac{E^2}{2 \cdot R} \quad (7.5)$$

Aplicando a lei dos cossenos no  $\Delta ABO$ , temos:

$$R^2 = F^2 + (R + G_F)^2 - 2 \cdot F \cdot (R + G_F) \cdot \cos \alpha$$

$$R^2 = F^2 + (R + G_F)^2 - 2 \cdot F \cdot (R + G_F) \cdot \frac{E + F}{R + G_F}$$

$$(R + G_F)^2 = R^2 + F^2 + 2 \cdot E \cdot F$$

$$G_F = \sqrt{R^2 + F \cdot (F + 2E)} - R \quad (7.6)$$

A folga dinâmica  $F_D$  é calculada em função da velocidade diretriz e do raio de curvatura pela equação abaixo:

$$F_D = \frac{V}{10\sqrt{R}} \quad (7.7)$$

Fazendo as devidas substituições, a fórmula geral para cálculo da superlargura é a seguinte:

$$S = 2 \cdot \left( L + \frac{E^2}{2R} + G_L \right) + \sqrt{R^2 + F \cdot (F + 2E)} - R + \frac{V}{10\sqrt{R}} - L_B \quad (7.8)$$

onde:  $S$  = superlargura, em metros.

$L$  = largura física do veículo, em  $m$ .

$E$  = distância entre eixos, em  $m$ .

$F$  = balanço direito do veículo, em  $m$ .

$R$  = raio da curva, em  $m$ .

$V$  = velocidade diretriz, em  $km/h$ .

$G_L$  = folga lateral do veículo em movimento, em  $m$ .

$L_b$  = largura básica da pista em tangente, em  $m$ .

Os valores do termo  $G_L$  são adotados em função da largura da pista de rolamento em tangente ( $L_b$ ), de acordo com a tabela abaixo:

TABELA 7.1 – Valores de  $G_L$ .

|           |             |             |             |
|-----------|-------------|-------------|-------------|
| $L_b$ (m) | 6,00 / 6,40 | 6,60 / 6,80 | 7,00 / 7,20 |
| $G_L$ (m) | 0,60        | 0,75        | 0,90        |

Fonte: DNER

Para caminhões e ônibus convencionais de dois eixos e seis rodas, não articulados (veículo CO), os valores adotados para projeto são:  $L = 2,60 m$ ;  $E = 6,10 m$  e  $F = 1,20 m$ . Em pistas com largura básica  $L_b = 7,20 m$  e adotando o veículo CO como veículo de projeto, a equação 7.8 fica reduzida a:

$$(Veículo CO) \quad S_{CO} = \sqrt{16,08 + R^2} + \frac{37,21}{R} + \frac{V}{10\sqrt{R}} - R - 0,20 \quad (7.9)$$

Para veículos comerciais articulados, compostos de uma unidade tratora simples e um semi-reboque (veículo SR), os valores adotados para projeto são:  $L = 2,60 m$ ;  $E = E_{eq} = 10,00 m$  e  $F = 1,20 m$ . Em pistas com largura básica  $L_b = 7,20 m$  e adotando o veículo SR como veículo de projeto, a equação 7.8 fica reduzida a:

$$(Veículo SR) \quad S_{SR} = \sqrt{25,44 + R^2} + \frac{100}{R} + \frac{V}{10\sqrt{R}} - R - 0,20 \quad (7.10)$$

A fórmula para cálculo da superlargura anteriormente adotada pelo DNER e utilizada em alguns países, denominada fórmula de VOSHILL-PALAZZO, é a seguinte:

$$S = n \cdot \left( R - \sqrt{R^2 - E^2} \right) + \frac{V}{10\sqrt{R}} \quad (7.11)$$

onde:  $E$  = distância entre eixos do veículo, em  $m$ .

$R$  = raio da curva, em  $m$ .

$V$  = velocidade diretriz, em  $km/h$ .

$n$  = número de faixas de rolamento.



Deve ser observado que a necessidade de superlargura aumenta com o porte do veículo e com a redução da largura básica da pista em tangente. A tabela

7.2 apresenta os valores dos raios acima dos quais é dispensável a superlargura.

TABELA 7.2 – Valores dos raios acima dos quais é dispensável a superlargura.

| V<br>(km/h) | 30  | 40  | 50  | 60  | 70  | 80  | 90  | 100 | Tipo de<br>Veículo |
|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--------------------|
| R (m)       | 130 | 160 | 190 | 220 | 260 | 310 | 360 | 420 | CO                 |
| R (m)       | 270 | 300 | 340 | 380 | 430 | 480 | 540 | 600 | SR                 |

LAGURA BÁSICA DA PISTA EM TANGENTE = 7,20 m.

| V<br>(km/h) | 30  | 40  | 50  | 60  | 70  | 80   | Tipo de<br>Veículo |
|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|------|--------------------|
| R (m)       | 340 | 430 | 550 | 680 | 840 | 1000 | CO                 |

LAGURA BÁSICA DA PISTA EM TANGENTE = 6,60 m.

Fonte: DNER

Em coerência com a ordem de grandeza das larguras de pista usualmente adotadas, os valores teóricos da superlargura devem, na prática, ser arredondados para múltiplos de 0,20 metros. Considera-se apropriado um valor mínimo de 0,40 metros para justificar a adoção da superlargura. Valores menores podem ser desprezados. Para pistas com mais de duas faixas, o critério recomendado pelo DNER consiste em 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.

## DISTRIBUIÇÃO DA SUPERLARGURA (pistas de 2 faixas)

A superlargura adotada pode ser disposta metade para cada lado da pista (alargamento simétrico) ou integralmente de um só lado da pista (alargamento assimétrico).

### 1) Alargamento simétrico da pista

Nos casos de curvas circulares dotadas de curvas de transição<sup>1</sup>, a superlargura será distribuída linearmente ao longo da transição, sendo mantido o valor total ao longo do trecho circular. Neste caso, será aplicada metade da superlargura para cada lado da pista, como mostra a figura 7.3.

Se o eixo de projeto se localiza no centro da pista em tangente, continuará no centro da pista no trecho de transição e no trecho circular.

O mesmo acontece com a sinalização horizontal ou a junta longitudinal de construção do pavimento (especialmente de placas de concreto de cimento portland).

<sup>1</sup> Todas as curvas que requerem superlargura possuem raios que requerem também curvas de transição.

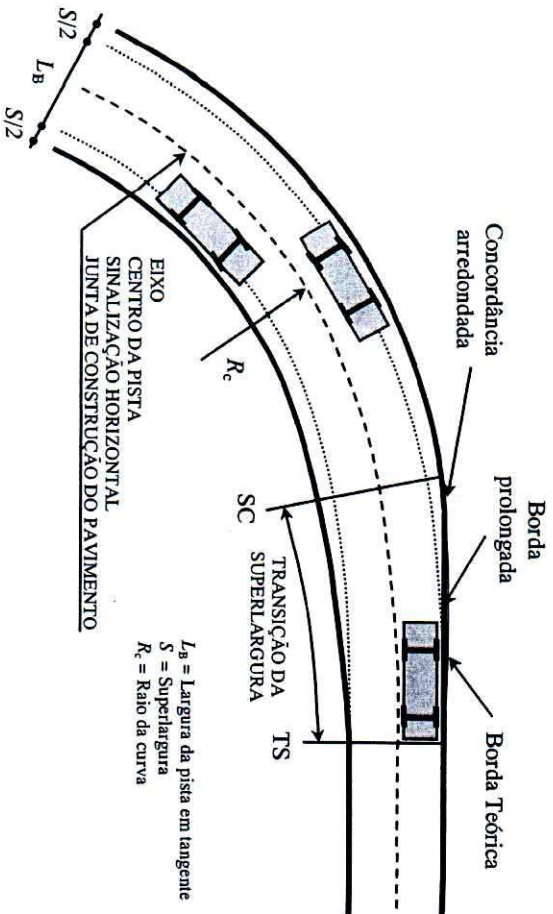


FIGURA 7.3 – Distribuição da superlargura numa curva de transição (Fonte: DNER).

## 2) Alargamento assimétrico da pista

No caso de curvas circulares simples, a superlargura será disposta do lado interno da curva. A distribuição da superlargura deverá ser feita parte na tangente e parte na curva, no mesmo trecho usado para a variação da superelevação.

Caso o eixo de projeto se localize no centro da pista em tangente, se situará de forma assimétrica em relação ao centro da pista. A sinalização horizontal e a junta longitudinal de construção do pavimento (especialmente de placas de concreto de cimento) deverá ser disposta no centro da pista alargada e não coincidente com o eixo do projeto.

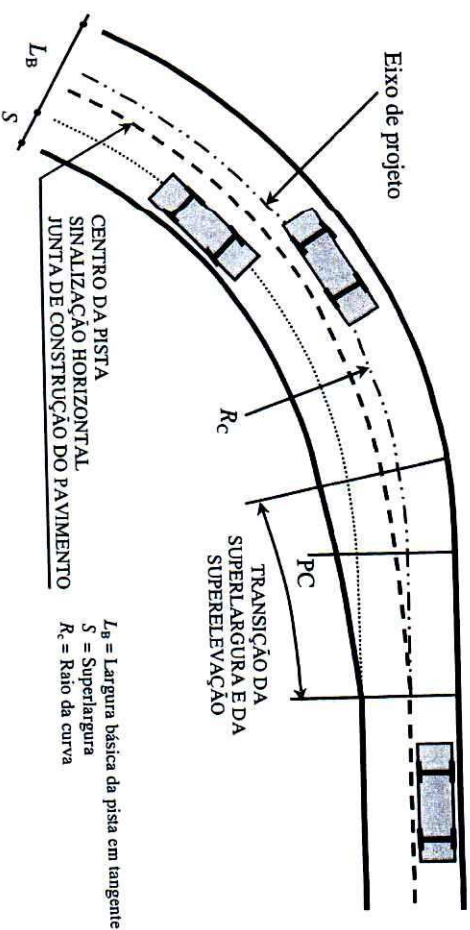


FIGURA 7.4 – Distribuição da superlargura numa curva circular simples (Fonte: DNER).

Em qualquer situação, deve-se suavizar as quebras do alinhamento das bordas da pista nos pontos de início e término do alargamento, introduzindo curvas de arredondamento com extensão entre 10 e 20 metros.

Geralmente, o alargamento da pista de rolamento para obtenção da superlargura é feito de forma linear.

Porém, de acordo com o DNER, onde se verificar uma combinação geométrica desfavorável, pode-se estabelecer um critério que permita obter grandes alargamentos já no início do trecho de transição entre tangente e curva circular.

**EXEMPLO 1:** Calcular a superlargura necessária numa curva. Dados:

- a) Raio = 400 m; Largura básica = 7,20 m;  $V = 100 \text{ km/h}$  (Veículo SR).  
 b) Raio = 300 m; Largura básica = 7,20 m;  $V = 90 \text{ km/h}$  (Veículo CO).

**Solução:**

$$a) S_{\text{TEÓRICO}} = \sqrt{25,44 + 400^2} + \frac{100}{400} + \frac{100}{10\sqrt{400}} - 400 - 0,20 = 0,58 \text{ m}$$

$$b) S_{\text{TEÓRICO}} = \sqrt{16,08 + 300^2} + \frac{37,21}{300} + \frac{90}{10\sqrt{300}} - 300 - 0,20 = 0,47 \text{ m}$$

**EXEMPLO 2:** Calcular a superlargura, sendo dados os seguintes elementos:

Largura do veículo:  $L = 2,60 \text{ m}$ .

Distância entre os eixos do veículo:  $E = 6,00 \text{ m}$ .

Distância entre a frente do veículo e o eixo dianteiro:  $F = 1,00 \text{ m}$ .

Raio da curva:  $R = 250 \text{ m}$ .

Velocidade de projeto:  $V = 80 \text{ km/h}$ .

Faixas de tráfego de 3,5 m ( $L_b = 7,0 \text{ m}$ ).

Número de faixas: 4.

**Solução:** Tabela 7.1  $\rightarrow G_L = 0,90 \text{ m}$ .

$$G_c = L + \frac{E^2}{2 \cdot R} = 2,60 + \frac{6^2}{2 \cdot (250)} = 2,672 \text{ m}$$

$$G_f = \sqrt{R^2 + F \cdot (F + 2E)} - R = \sqrt{250^2 + 1,0 \cdot [1,0 + 2 \cdot (6)]} - 250 = 0,026 \text{ m}$$

$$F_b = \frac{V}{10\sqrt{R}} = \frac{80}{10\sqrt{250}} = 0,51 \text{ m}$$

$$S = [2 \cdot (G_c + G_L) + G_f] + F_b - L_b$$

$$S = [2 \cdot (2,672 + 0,90) + 0,026] + 0,51 - 7,00$$

$$S = 0,68$$

$$4 \text{ faixas} \rightarrow S' = 1,50 \cdot S = 1,0 \text{ m}$$

## EXERCÍCIOS

1. Calcular a superlargura, sendo dados os seguintes elementos:

Largura do veículo:  $L = 2,50 \text{ m}$ .

Distância entre os eixos do veículo:  $E = 6,50 \text{ m}$ .

Distância entre a frente do veículo e o eixo dianteiro:  $F = 1,10 \text{ m}$ .

Raio da curva:  $R = 280 \text{ m}$ .

Velocidade de projeto:  $V = 90 \text{ km/h}$ .

Faixas de tráfego de 3,3 m ( $L_b = 6,6 \text{ m}$ ).

Número de faixas: 2.

2. Idem, para:

Largura do veículo:  $L = 2,50 \text{ m}$ .

Distância entre os eixos do veículo:  $E = 6,10 \text{ m}$ .

Distância entre a frente do veículo e o eixo dianteiro:  $F = 1,20 \text{ m}$ .

Raio da curva:  $R = 200 \text{ m}$ .

Velocidade de projeto:  $V = 80 \text{ km/h}$ .

Faixas de tráfego de  $3,6 \text{ m}$  ( $L_b = 7,2 \text{ m}$ ).

Número de faixas: 2.

3. Idem, para:

Largura do veículo:  $L = 2,40 \text{ m}$ .

Distância entre os eixos do veículo:  $E = 7,0 \text{ m}$ .

Distância entre a frente do veículo e o eixo dianteiro:  $F = 1,40 \text{ m}$ .

Raio da curva:  $R = 180 \text{ m}$ .

Velocidade de projeto:  $V = 100 \text{ km/h}$ .

Faixas de tráfego de  $3,6 \text{ m}$  ( $L_b = 7,2 \text{ m}$ ).

Número de faixas: 2.

4. Calcular a superlargura necessária numa curva:

a)  $R = 250 \text{ m}$ ;  $L_b = 7,20 \text{ m}$ ;  $V = 100 \text{ km/h}$  (Veículo SR).

b)  $R = 280 \text{ m}$ ;  $L_b = 7,00 \text{ m}$ ;  $V = 90 \text{ km/h}$  (Veículo CO).

5. Calcular a superlargura pela fórmula de VOSHILL-PALAZZO:

Dados:  $E = 6,00 \text{ m}$ ,  $R = 350 \text{ m}$ ,  $V = 80 \text{ km/h}$ ,  $n = 2$ .

## CAPÍTULO 8

# CURVAS VERTICAIS

*"Não existe professor que, na prática, não termine acreditando na magia que se opera durante um bom discurso."*

**ALLAN BLOOM**

Pedagogo americano

## INTRODUÇÃO

O projeto de uma estrada em perfil é constituído de greides retos, concordados dois a dois por curvas verticais. Os greides retos são definidos pela sua declividade, que é a tangente do ângulo que fazem com a horizontal. Na prática, a declividade é expressa em percentagem.

Nos greides ascendentes os valores das rampas ( $i$ ) são considerados positivos e nos greides descendentes negativos, conforme indicado na figura 8.1. Para fazer esta convenção é necessário dar um sentido ao perfil, que é geralmente o mesmo do estaqueamento.

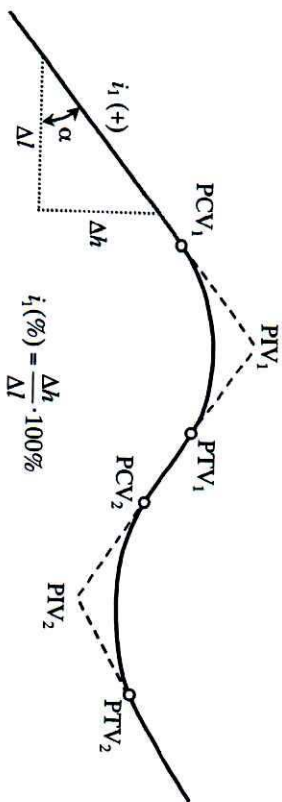


FIGURA 8.1 – Perfil de uma estrada.

À interseção dos greides retos dá-se a denominação de PIV (ponto de interseção vertical). Os pontos de tangência são denominados de PCV (ponto de curva vertical) e PTV (ponto de tangência vertical), por analogia com a curva circular do projeto em planta. A medida do comprimento de uma curva vertical ( $L$ ) é feita sobre a projeção horizontal da curva.

As curvas clássicas de concordância empregadas em todo o mundo são as seguintes: parábola de 2º grau, curva circular, elipse e parábola cúbica. O DNER recomenda o uso de parábolas de 2º grau no cálculo de curvas verticais, de preferência simétricas em relação ao PIV, ou seja, a projeção horizontal das distâncias do PIV ao PCV e do PIV ao PTV são iguais a  $L/2$ , como mostrado na figura 8.2a.

Essas parábolas são definidas pelo seu parâmetro de curvatura  $K$ , que traduz a taxa de variação da declividade longitudinal na unidade do comprimento,

estabelecida para cada velocidade. O valor de  $K$  representa o comprimento da curva no plano horizontal, em metros, para cada 1% de variação na declividade longitudinal.

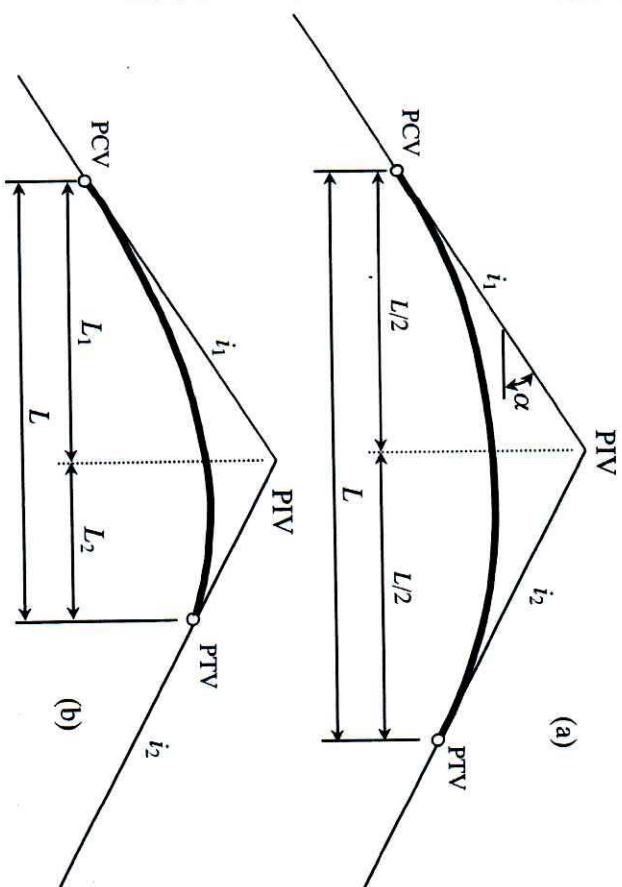
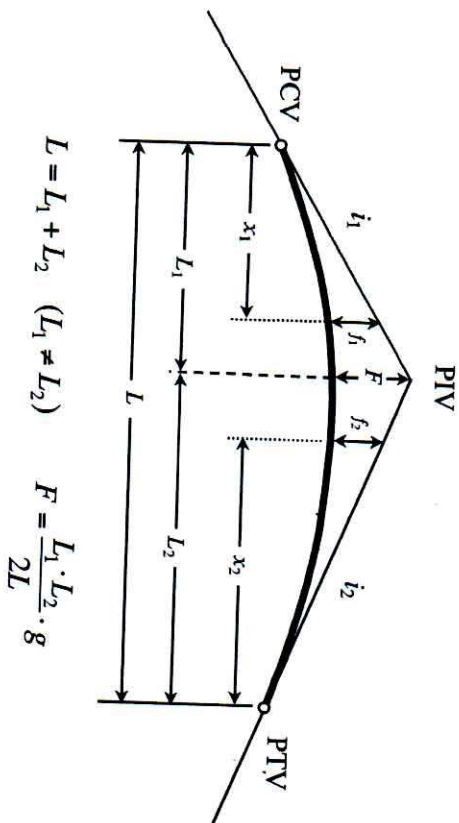


FIGURA 8.2a – Parábolas de 2º grau: (a) simples; (b) composta.

Entre as vantagens da parábola de segundo grau, podemos citar:

- A equação da curva é simples.
- A transformada da parábola devido às 2 escalas no perfil é também uma parábola.

- A taxa de variação de declividade da parábola é constante.
- O PCV e o PTV podem ser localizados em estaca inteira ou +10,00, como convém no projeto e no perfil definitivo.
- É desnecessário o uso de tabelas ou gabaritos para desenhar a curva no projeto.



$$L = L_1 + L_2 \quad (L_1 \neq L_2) \quad F = \frac{L_1 \cdot L_2}{2L} \cdot g$$

$$f_1 = \frac{F}{L_1^2} \cdot x_1^2$$

$$f_2 = \frac{F}{L_2^2} \cdot x_2^2$$

FIGURA 8.2b – Elementos da parábola de 2º grau composta.

Nos estudos de curvas verticais é muito utilizada a expressão  $i_1 - i_2$ , que é a variação total da declividade do greide.

$$g = i_1 - i_2$$

(8.1)

A expressão  $i_1 - i_2$  é algébrica. Na utilização da fórmula 8.1, os sinais das rampas  $i_1$  e  $i_2$  devem ser mantidos.

Pelo sinal de  $g$  podemos dizer se a curva é côncava ou convexa. Quando  $g > 0$  a curva será convexa e se  $g < 0$  a curva será côncava.

A parábola simples é uma curva muito próxima a uma circunferência. Por isso, é usual referir-se ao valor do raio  $R_v$  da curva vertical, que deve ser entendido como o menor raio instantâneo da parábola. A equação abaixo relaciona  $R_v$  e  $L$ .

$$L = R_v \cdot |g| = R_v \cdot |i_1 - i_2|$$

(8.2)

Um processo prático para a escolha do valor  $L$  consiste no uso de gabaritos especiais para curvas verticais, que colocados sobre o desenho das rampas preestabelecidas definem o valor de  $R_v$  que melhor atende às condições do projeto. Obtido  $R_v$ , o valor de  $L$  pode ser calculado pela equação 8.2.

Em curvas de mesmo raio, o conforto nas convexas é maior que nas côncavas. Nas côncavas, a aceleração da gravidade terrestre e a aceleração centrífuga se somam. Nas convexas, as referidas acelerações são subtraídas, gerando um certo efeito de flutuação.

### TIPOS DE CURVAS VERTICAIS

A figura 8.3 mostra os tipos usuais de curvas verticais.

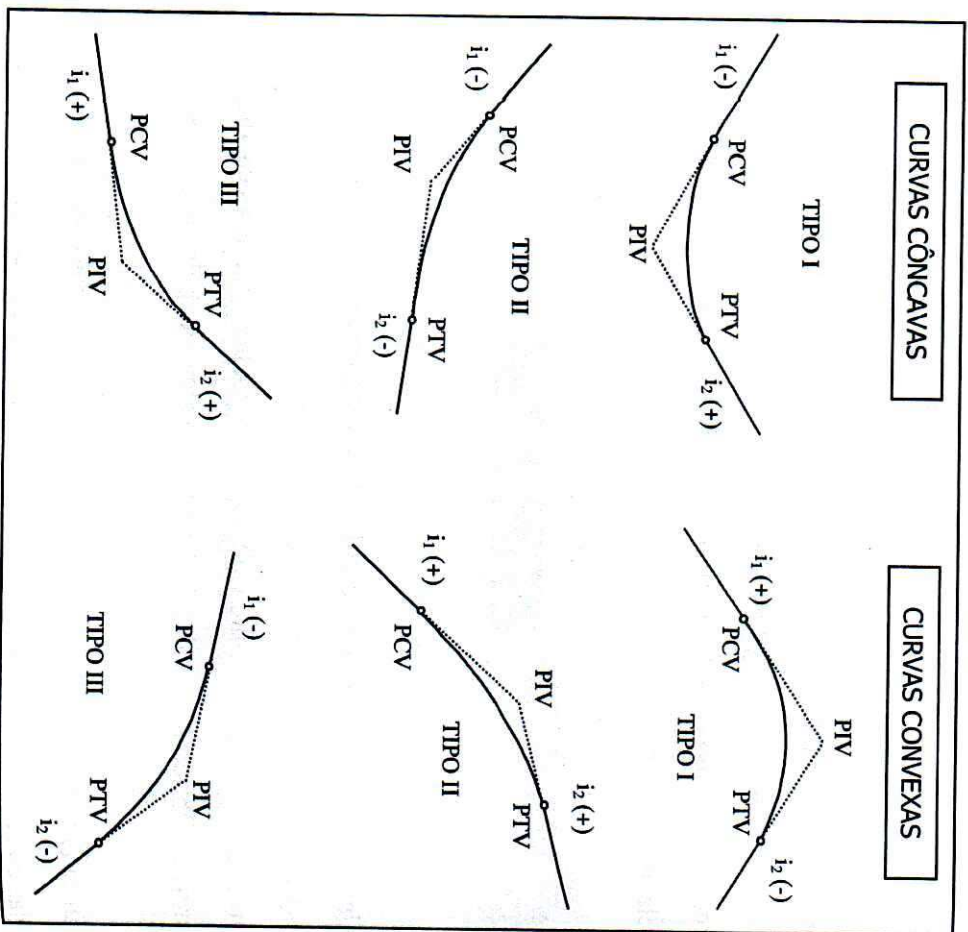


FIGURA 8.3 – Tipos de curvas verticais.

### CÁLCULO DAS COTAS E FLECHAS DA PARÁBOLA SIMPLES

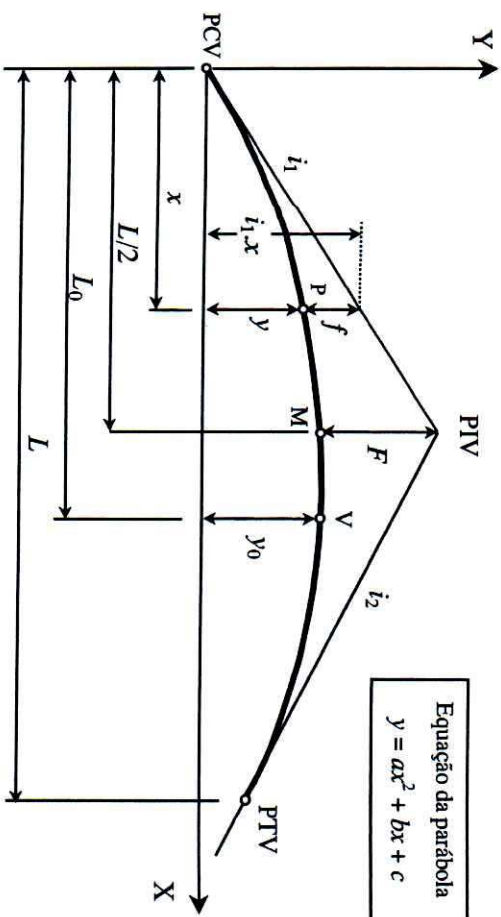


FIGURA 8.4 – Esquema para cálculo das cotas e flechas da parábola.

Para a determinação dos coeficientes  $a$ ,  $b$  e  $c$  da equação da parábola  $y = ax^2 + bx + c$ , procedemos da seguinte maneira:

1) Na origem do sistema de eixos, temos:

$$\left. \begin{matrix} x = 0 \\ y = 0 \end{matrix} \right\} \Rightarrow c = 0$$

2) A derivada da curva no ponto PCV é igual à inclinação da reta tangente à curva:

$$\frac{d}{dx}(ax^2 + bx + c) = i_1$$

$$\begin{cases} 2ax + b = i_1 \\ x = 0 \end{cases} \rightarrow b = i_1$$

3) A derivada da curva no ponto PTV é igual à inclinação da reta tangente à curva:

$$\frac{d}{dx}(ax^2 + bx + c) = i_2$$

$$\begin{cases} 2ax + b = i_2 \\ x = L \end{cases} \rightarrow 2aL + i_1 = i_2 \quad \therefore$$

$$a = (i_2 - i_1) / 2L$$

Substituindo os valores de  $a$ ,  $b$  e  $c$ , e fazendo  $g = i_1 - i_2$ , a equação geral da parábola é a seguinte:

$$y = \frac{-g}{2L} \cdot x^2 + i_1 \cdot x \quad (8.3)$$

A equação 8.3 fornece a ordenada  $y$  de qualquer ponto de abscissa  $x$  da curva, permitindo a determinação das coordenadas dos pontos da curva em relação ao PCV. Para o cálculo das cotas de um ponto genérico  $P$  em relação a um plano de referência, a equação utilizada é a seguinte:

$$Cota(P) = \frac{-g}{2L} \cdot x^2 + i_1 \cdot x + Cota(PCV)$$

(8.4)

Ainda com relação ao gráfico 8.4, temos as seguintes relações:

$$f + y = i_1 \cdot x \quad \therefore \quad f - \frac{g}{2L} \cdot x^2 + i_1 \cdot x = i_1 \cdot x$$

$$f = \frac{g}{2L} \cdot x^2 \quad (8.5)$$

onde:

$f$  = flecha da parábola.

$g$  = diferença algébrica das rampas.

$L$  = comprimento da curva vertical.

$x$  = distância horizontal do ponto de cálculo da flecha ao PCV.

Em particular, no ponto PTV, temos a flecha máxima, que é a seguinte:

$$F = \frac{g}{2L} \cdot \left(\frac{L}{2}\right)^2$$

$$F = \frac{g \cdot L}{8} \quad (8.6)$$





## COMPRIIMENTO MÍNIMO DE CURVAS VERTICAIS

(Critério da Distância de Visibilidade)

Os elementos retos que constituem o perfil longitudinal de uma estrada são concordados por curvas verticais, convexas ou côncavas, cujos comprimentos mínimos devem satisfazer os requisitos de visibilidade.

Definidos os valores mínimos do comprimento da curva devemos, sempre que possível, usar comprimentos maiores que os mínimos estabelecidos. A adoção de valores próximos aos mínimos admissíveis leva a curvas muito curtas que devem ser evitadas.

O comprimento das curvas verticais se fixa de acordo com as distâncias de visibilidade. São duas as principais distâncias de visibilidade a serem consideradas:

- parada (situação mínima).
- ultrapassagem (situação especial).

A consideração da distância de visibilidade de ultrapassagem geralmente leva a valores exagerados para o comprimento das curvas verticais, que são de difícil aplicação na prática.

## COMPRIIMENTO MÍNIMO DE CURVAS CONVEXAS

O mínimo comprimento das curvas verticais convexas é determinado em função das condições necessárias de visibilidade nas curvas, de forma a dar ao motorista o espaço necessário a uma frenagem segura, quando este avista um obstáculo parado em sua trajetória. O critério recomendado<sup>1</sup> requer que um motorista com seu campo de visão situado a uma altura  $H = 1,10\text{ m}$  acima do plano da pista enxergue um obstáculo situado sobre a pista, com altura  $h = 0,15\text{ m}$ .

**CASO I:** a distância de visibilidade ( $S$ ) é menor ou igual ao comprimento da curva ( $L$ ), isto é,  $S \leq L$ .

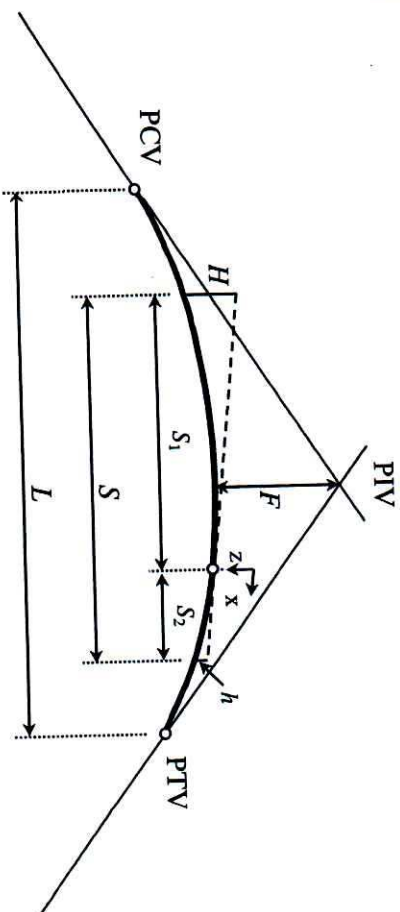


FIGURA 8.5 – Comprimento mínimo de curvas verticais convexas ( $S \leq L$ ).

<sup>1</sup> Outro critério considera um veículo ultrapassando que se defronta com outro veículo em sentido oposto, empregando-se uma altura  $h_1$  para os olhos dos motoristas, uma altura  $h_2$  para os veículos e uma distância dupla de visibilidade de parada.

Na figura anterior, a equação da parábola para o sistema de eixos escolhido é:

$$z = k \cdot x^2 = \frac{F}{(L/2)^2} \cdot x^2$$

Ainda com relação à figura 8.5, temos:

$$H = k \cdot S_1^2$$

e

$$h = k \cdot S_2^2$$

fazendo as devidas substituições, temos:

$$\frac{H}{S_1^2} = \frac{F}{(L/2)^2}$$

e

$$\frac{h}{S_2^2} = \frac{F}{(L/2)^2}$$

onde:

$$S_1 = \frac{L}{2} \cdot \sqrt{\frac{H}{F}}$$

e

$$S_2 = \frac{L}{2} \cdot \sqrt{\frac{h}{F}}$$

substituindo estes valores na equação  $S = S_1 + S_2$ , temos:

$$S = \frac{\sqrt{H} \cdot L/2 + \sqrt{h} \cdot L/2}{\sqrt{F}} = \frac{L}{2} \cdot \left( \frac{\sqrt{H} + \sqrt{h}}{\sqrt{F}} \right)$$

numa curva vertical:

$$F = \frac{A \cdot L}{800}$$

onde:

$$S = \frac{10 \sqrt{8} \cdot L \cdot (\sqrt{H} + \sqrt{h})}{2 \cdot \sqrt{A} \cdot L}$$

$$L = \frac{S^2}{200 \cdot (\sqrt{H} + \sqrt{h})^2} \cdot A$$

substituindo os valores  $H = 1,10 \text{ m}$  e  $h = 0,15 \text{ m}$ , temos:

$$L = \frac{S^2}{412} \cdot A = K \cdot A$$

Na condição limite, temos  $S = D_p$ . Logo, o comprimento mínimo da curva vertical é:

$$L_{\min} = \frac{D_p^2}{412} \cdot A = K_{\min} \cdot A$$

(8.12)

onde:

$L_{\min}$  = comprimento mínimo da curva vertical, em metros.

$D_p$  = distância de visibilidade de parada, em metros.

$A$  = diferença algébrica das rampas, em %.

$K$  = parâmetro da parábola, em metros.

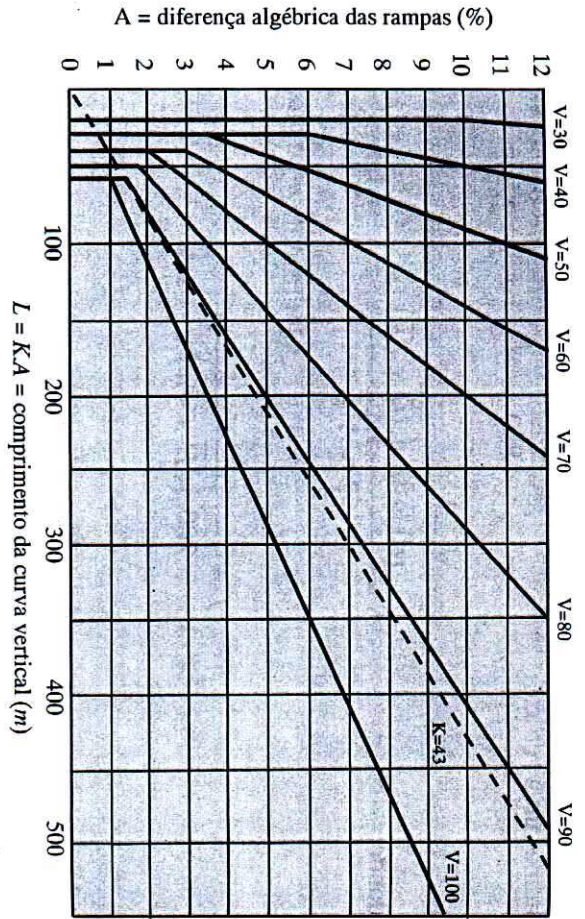


FIGURA 8.6 – Comprimentos de curvas verticais convexas (condições recomendadas).

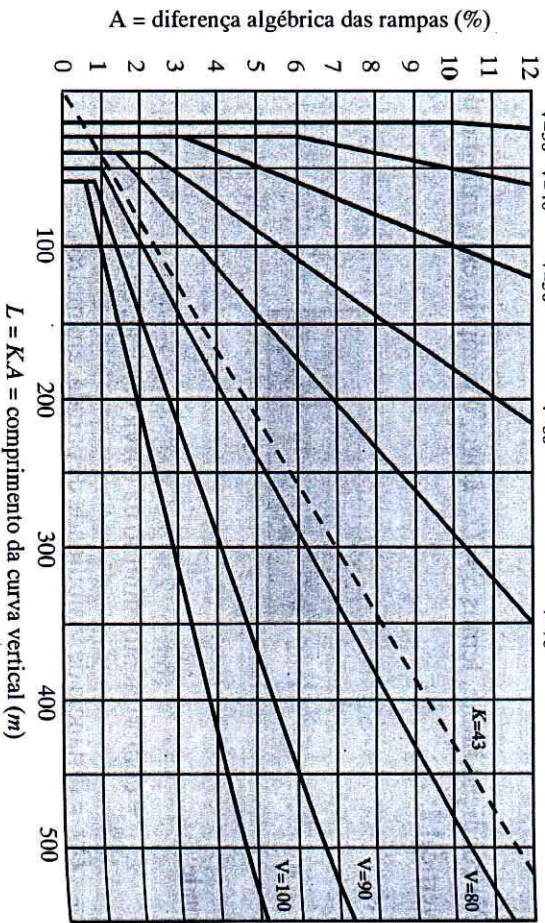


FIGURA 8.7 – Comprimentos de curvas verticais convexas (condições excepcionais).

Os valores correspondentes a esse critério, arredondados para fins de projeto, estão representados nas figuras 8.6 e 8.7. Segundo o DNER, para valores de K maiores que 43, a drenagem no trecho deverá receber maior atenção.

**CASO II:** a distância de visibilidade é maior que o comprimento da curva, isto é,  $S > L$ .

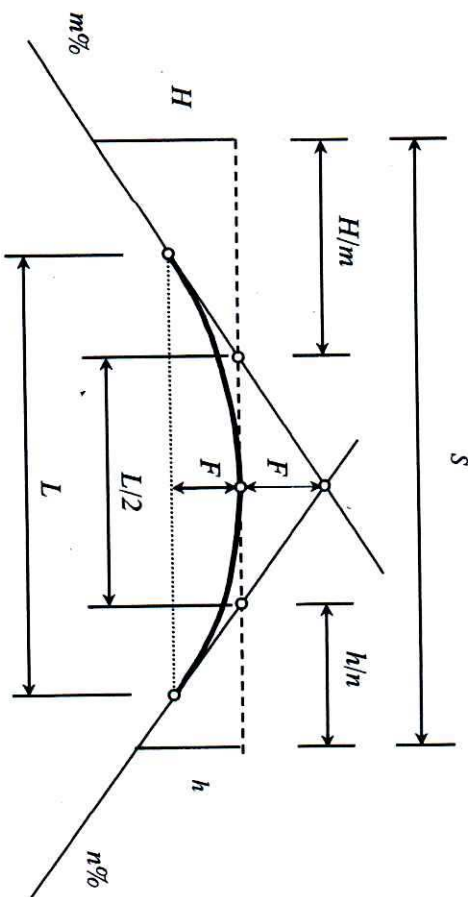


FIGURA 8.8 – Comprimento mínimo de curvas verticais convexas ( $S > L$ ).

Da figura 8.8, podemos deduzir:

$$S = \frac{L}{2} + \frac{H}{m} + \frac{h}{n}$$

Para  $S$  mínimo, a linha de visão deve ser tangente ao vértice da curva. Logo, a taxa de variação de  $n$  deve ser igual e oposta à de  $m$ , ou seja:

$$\frac{dS}{dm} = 0 = -\frac{H}{m^2} + \frac{h}{n^2}$$

$$\frac{H}{m^2} = \frac{h}{n^2}$$

onde:

$$m = n \cdot \sqrt{\frac{H}{h}} \quad \text{e} \quad n = m \cdot \sqrt{\frac{h}{H}}$$

escrevendo  $m$  e  $n$  em função da diferença algébrica dos greides ( $A$ ), temos:

$$m = \frac{A/100}{\sqrt{\frac{h}{H}} + 1} \quad \text{e} \quad n = \frac{A/100}{\sqrt{\frac{H}{h}} + 1}$$

substituindo os valores de  $m$  e  $n$  na equação  $S = \frac{L}{2} + \frac{H}{m} + \frac{h}{n}$ , temos:

$$S = \frac{L}{2} + \frac{\left(\sqrt{h} + \sqrt{H}\right)^2}{A/100}$$

isolando  $L$ :

$$L = 2S - \frac{2\left(\sqrt{h} + \sqrt{H}\right)^2}{A/100}$$

substituindo os valores  $H = 1,10 \text{ m}$  e  $h = 0,15 \text{ m}$ , temos:  $L = 2S - \frac{412}{A}$

Na condição limite, temos  $S = D_p$ . Logo, o comprimento mínimo da curva vertical é:

$$L_{\min} = 2 \cdot D_p - \frac{412,4808}{A}$$

(8.13)

onde:  $L_{\min}$  = comprimento mínimo da curva vertical, em metros.

$D_p$  = distância de visibilidade de parada, em metros.

$A$  = diferença algébrica das rampas, em %.

### COMPRIMENTO MÍNIMO DE CURVAS CÔNCAVAS

Durante o dia e no caso de pistas iluminadas artificialmente, geralmente não ocorrem problemas de visibilidade. Para pistas não iluminadas, aplica-se o critério da visibilidade noturna, ou seja, a pista deve ser iluminada à distância de visibilidade de parada pelo farol do veículo, por hipótese situado a  $0,61 \text{ m}$  acima do plano da pista, supondo que o seu fecho luminoso diverge de  $1^\circ$  do eixo longitudinal do veículo.

**CASO I:** a distância de visibilidade ( $S$ ) é menor ou igual ao comprimento da curva ( $L$ ), isto é,  $S \leq L$ .

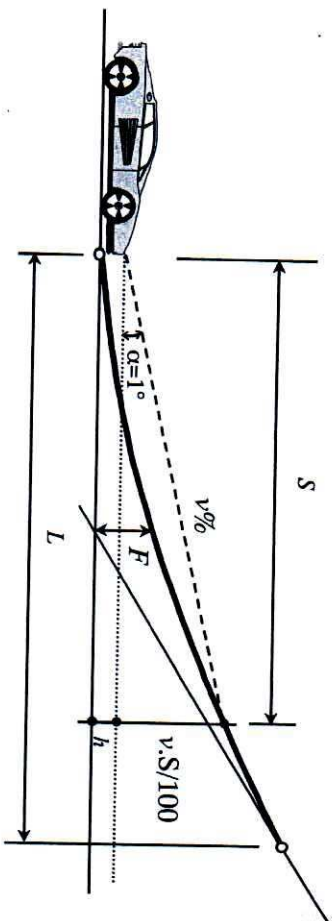


FIGURA 8.9 – Comprimento mínimo de curvas verticais côncavas ( $S \leq L$ ).

Da figura 8.9 pode-se deduzir:

$$\frac{F}{(L/2)^2} = \frac{\frac{v \cdot S}{100} + h}{S^2}$$

Sendo  $F = \frac{A \cdot L}{800}$ , temos:

$$\frac{A \cdot L}{800} \frac{1}{(L/2)^2} = \frac{v \cdot S + 100 \cdot h}{100 \cdot S^2}$$

$$L = \frac{A \cdot S^2}{2 \cdot (v \cdot S + 100 \cdot h)}$$

Empregando os valores recomendados, temos:

$$\left\{ \begin{array}{l} h = 0,61 \text{ m} \\ v = 1,75\% \end{array} \right.$$

$$L = \frac{S^2}{122 + 3,5 \cdot S} \cdot A = K \cdot A$$

Na condição limite, temos  $S = D_p$ . Logo, a equação se reduz a:

$$L_{\min} = \frac{D_p^2}{122 + 3,5 \cdot D_p} \cdot A = K_{\min} \cdot A$$

(8.14)

onde:

$L_{\min}$  = comprimento mínimo da curva vertical, em metros.

$D_p$  = distância de visibilidade de parada, em metros.

$A$  = diferença algébrica das rampas, em %.

$K$  = parâmetro da parábola, em metros.

Os valores correspondentes a esse critério, arredondados para fins de projeto, estão representados nas figuras 8.10 e 8.11.

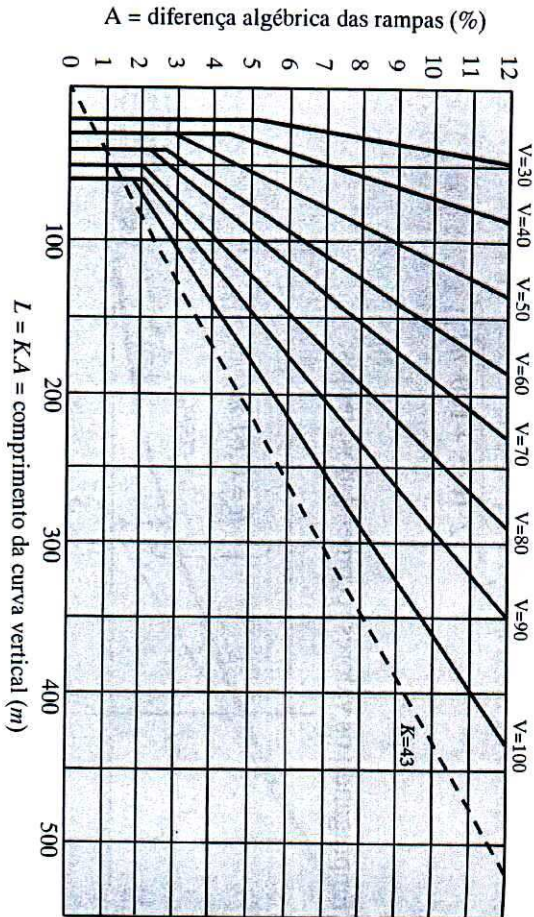


FIGURA 8.10 – Comprimento de curvas verticais côncavas (condições recomendadas).

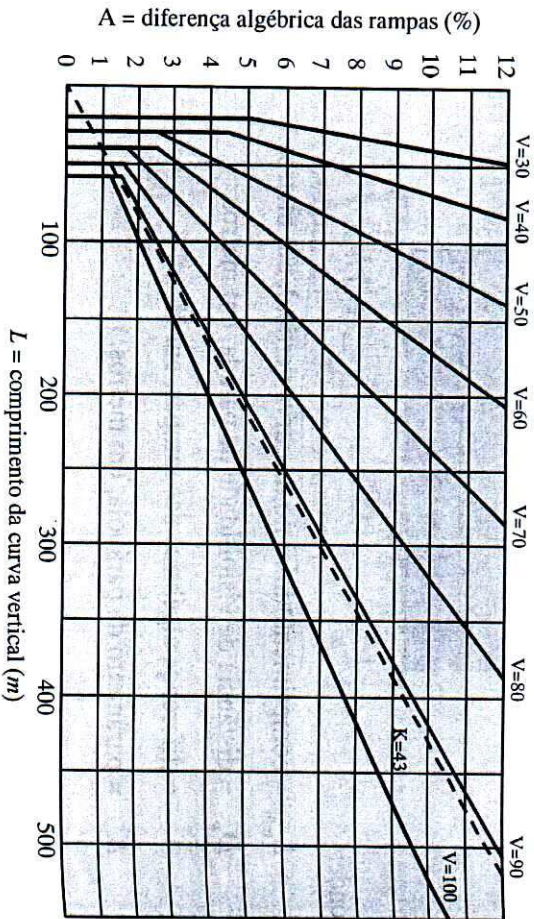


FIGURA 8.11 – Comprimento de curvas verticais côncavas (condições excepcionais).

**CASO II:** a distância de visibilidade é maior que o comprimento da curva, isto é,  $S > L$ .

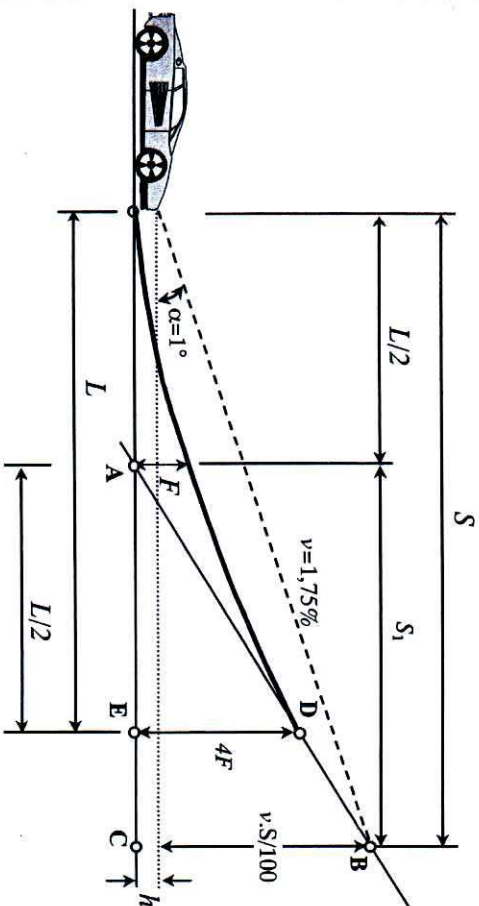


FIGURA 8.12 – Comprimento mínimo de curvas verticais côncavas ( $S > L$ ).

Na figura 8.12, podemos observar que:

$$S = \frac{L}{2} + S_1$$

Dos triângulos semelhantes ABC e ADE podemos deduzir:

$$\frac{S_1}{\frac{v \cdot S}{100} + h} = \frac{L/2}{4F}$$

sendo  $F = \frac{A \cdot L}{800}$ , podemos escrever:

$$S_1 = \frac{(v \cdot S / 100) + h}{A / 100}$$

onde:

$$S = \frac{L}{2} + \frac{v \cdot S + 100 \cdot h}{A}$$

Isolando o valor de  $L$  e empregando os valores recomendados  $h = 0,61 \text{ m}$  e  $v = 1,75\%$ , temos:

$$L = 2S - \frac{122 + 3,5 \cdot S}{A}$$

Na condição limite, temos  $S = D_p$ . Logo, a equação fica:

$$L_{\min} = 2D_p - \frac{122 + 3,5 \cdot D_p}{A}$$

(8.15)

onde:

$L_{\min}$  = comprimento mínimo da curva vertical, em metros.

$D_p$  = distância de visibilidade de parada, em metros.

$A$  = diferença algébrica das rampas, em %.

Para facilidade de cálculo e locação, os valores adotados para  $L$  são geralmente arredondados para múltiplos de 20 metros.

Para ambos os casos (curvas convexas e curvas côncavas), valores muito pequenos para  $L$  não são desejáveis. Pelo critério do mínimo valor absoluto, o comprimento mínimo das curvas verticais deve permitir ao motorista perceber a alteração de declividade longitudinal.

Adotando para essa percepção um período de tempo mínimo de 2 segundos, o comprimento mínimo da curva vertical de acordo com esse critério é dado pela fórmula a seguir:

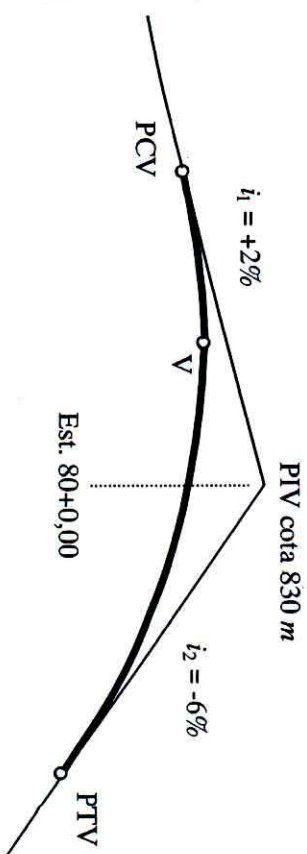
$$L_{\min} = 0,6 \cdot V$$

(8.16)

onde:  $V$  = velocidade diretriz, em  $km/h$ .

$L_{\min}$  = comprimento mínimo da curva vertical, em metros.

**EXEMPLO 1:** Calcular os elementos notáveis da curva abaixo e completar a tabela a seguir. O raio da curva vertical ( $R_v$ ) é igual a 3000  $m$  e a distância de visibilidade de parada ( $D_p$ ) é igual a 98  $m$ .





**Solução:**

$$g = i_1 - i_2 = 2\% - (-6\%) = 8\% = 0,08$$

$$L = g \cdot R_v = 0,08 \cdot 3000 = 240 \text{ m}$$

Verificação de  $L_{\min}$ :

$$D_p < L \rightarrow L_{\min} = \frac{D_p^2}{412} \cdot A = \frac{98^2}{412} \cdot [2 - (-6)] = 186,50 \text{ m} \quad (\text{OK})$$

Flecha máxima:

$$F = \frac{g \cdot L}{8} = \frac{0,08 \cdot 240}{8} = 2,40 \text{ m}$$

Cálculo das estacas e cotas do PCV e PTV:  $L/2 = 120 \text{ m} = 6 \text{ estacas}$ 

$$Est(PCV) = 80 - 6 = 74 + 0,00$$

$$Est(PTV) = 80 + 6 = 86 + 0,00$$

$$Cota(PCV) = Cota(PIV) - \frac{i_1 \cdot L}{2} = 830 - \frac{0,02 \cdot 240}{2} = 827,60 \text{ m}$$

$$Cota(PTV) = Cota(PIV) + \frac{i_2 \cdot L}{2} = 830 + \frac{(-0,06) \cdot 240}{2} = 822,80 \text{ m}$$

Cálculo do vértice V:

$$L_0 = \frac{i_1 \cdot L}{g} = \frac{0,02 \cdot 240}{0,08} = 60 \text{ m} = 3 \text{ est} + 0,00 \text{ m}$$

$$y_0 = \frac{i_1^2 \cdot L}{2g} = \frac{(0,02)^2 \cdot 240}{2 \cdot (0,08)} = 0,60 \text{ m}$$

$$E(V) = E(PCV) + [L_0] = (74 + 0,00) + (3 + 0,00) = 77 \text{ est} + 0,00 \text{ m}$$

$$Cota(V) = Cota(PCV) + y_0 = 827,60 + 0,60 = 828,20 \text{ m}$$

Expressão para cálculo das ordenadas da parábola:

$$f = \frac{g}{2L} \cdot x^2 = \frac{0,08}{2 \cdot 240} \cdot x^2 = 1,6667 \cdot 10^{-4} \cdot x^2$$

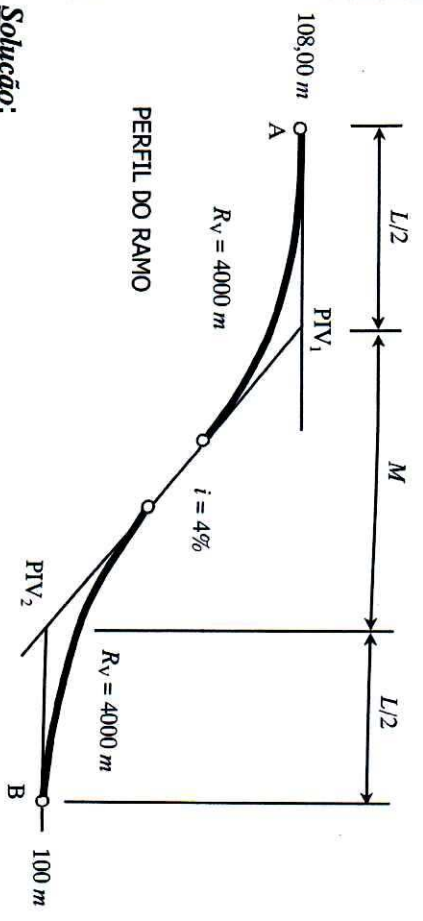
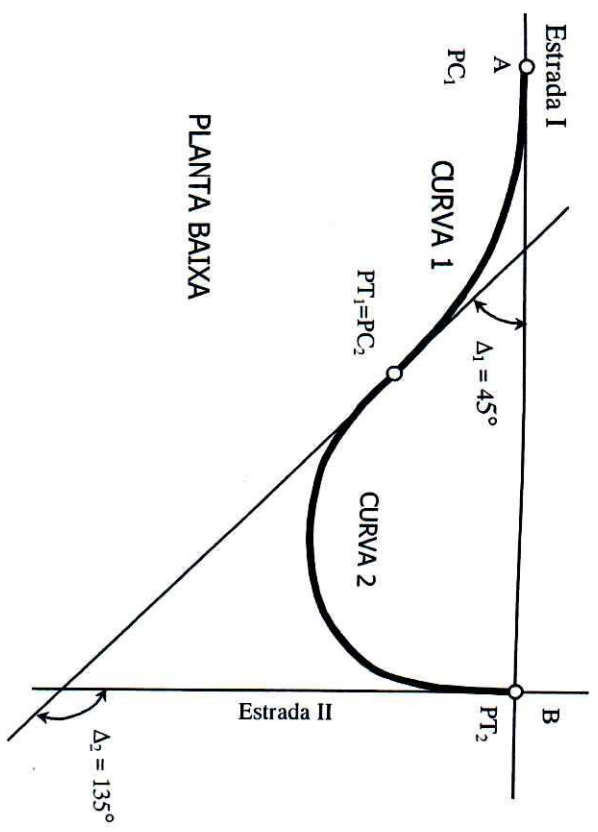
Adotando para  $x$  uma variação de 20 em 20 m, temos a seguinte tabela:

NOTA DE SERVIÇO DE TERRAPLENAGEM

| EST.   | COTAS (m) |             | ORDENADAS DA PARÁBOLA | GREIDE DE PROJETO | COTAS VERMELHAS |            |
|--------|-----------|-------------|-----------------------|-------------------|-----------------|------------|
|        | TERRENO   | GREIDE RETO |                       |                   | CORTE (+)       | ATERRO (-) |
| 74=PCV | 820,00    | 827,60      | 0,00                  | 827,60            |                 | 7,6        |
| 75     | 821,10    | 828,00      | 0,07                  | 827,93            |                 | 6,83       |
| 76     | 822,00    | 828,40      | 0,27                  | 828,13            |                 | 6,13       |
| 77     | 823,00    | 828,80      | 0,60                  | 828,20            |                 | 5,2        |
| 78     | 824,00    | 829,20      | 1,07                  | 828,13            |                 | 4,13       |
| 79     | 825,12    | 829,60      | 1,67                  | 827,93            |                 | 2,81       |
| 80=PIV | 826,40    | 830,00      | 2,40                  | 827,60            |                 | 1,2        |
| 81     | 827,80    | 828,80      | 1,67                  | 827,13            |                 | 0,67       |
| 82     | 828,20    | 827,60      | 1,07                  | 826,54            |                 | 1,66       |
| 83     | 828,90    | 826,40      | 0,60                  | 825,80            |                 | 3,1        |
| 84     | 829,15    | 825,20      | 0,27                  | 824,94            |                 | 4,21       |
| 85     | 830,30    | 824,00      | 0,07                  | 823,94            |                 | 6,36       |
| 86=PTV | 830,50    | 822,80      | 0,00                  | 822,80            |                 | 7,7        |

**EXEMPLO 2:** Dadas as figuras a seguir, calcular os raios das curvas 1 e 2 de forma a atender as seguintes condições (extraído das notas de aula do professor Carlos Pimenta):

- a)  $R_1 = 2R_2$  (reversas).
- b) as estradas I e II são perpendiculares entre si e estão em nível.
- c) o ponto A está na cota 108,00 e o ponto B na cota 100,00.
- d) raios das curvas verticais:  $R_v = 4.000\text{ m}$ .
- e) rampa única de concordância dos greides:  $i = 4\%$
- f) obrigatoriamente  $PCV_1=A$  e  $PTV_2=B$ .



**Solução:**

Comprimento das curvas verticais:

$$L = R_v \cdot |\delta| = 4000 \cdot (0 + 0,04) = 160\text{ m}$$

Distância de  $PTV_1$  a  $PTV_2$ :

$$M = \frac{H}{i} = \frac{108,00 - 100,00}{0,04} = 200 \text{ m}$$

Desenvolvimento do trecho em perfil:

$$D = M + 2 \cdot \frac{L}{2} = 200 + 160 = 360 \text{ m}$$

Desenvolvimento do trecho em planta:

$$D_1 = \frac{R_1 \cdot \Delta_1 \cdot \pi}{180^\circ} = \frac{R_1 \cdot 45^\circ \cdot \pi}{180^\circ} = 0,7854 \cdot R_1$$

$$D_2 = \frac{R_2 \cdot \Delta_2 \cdot \pi}{180^\circ} = \frac{R_2 \cdot 135^\circ \cdot \pi}{180^\circ} = 2,3562 \cdot R_2$$

$$D = D_{total} = D_1 + D_2 = 0,7854 \cdot R_1 + 2,3562 \cdot R_2 = 3,9270 \cdot R_2$$

$PCV_1 = A$  e  $PTV_2 = B$ , logo:

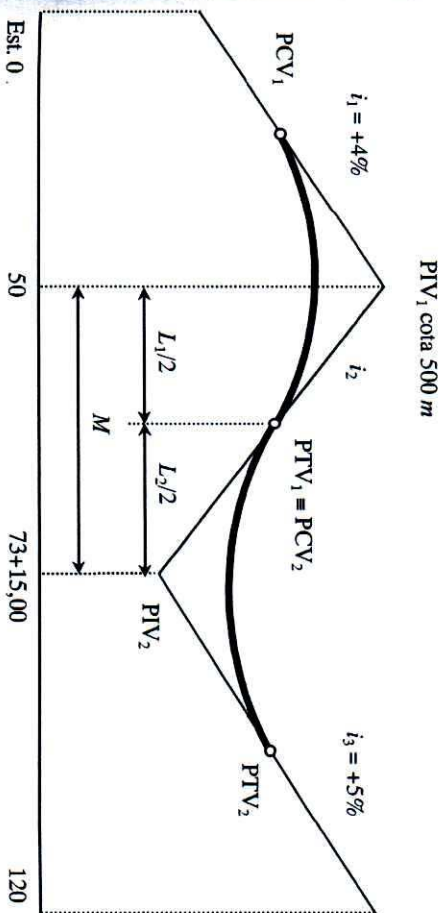
Desenvolvimento em planta = Desenvolvimento em perfil.

$$3,927 \cdot R_2 = 360$$

$$R_2 = 91,67 \text{ m}$$

$$R_1 = 2 \cdot R_2 = 183,35 \text{ m}$$

**EXEMPLO 3:** Com base na figura, sendo  $Rv_1 = 10.000 \text{ m}$  e  $Rv_2 = 5.000 \text{ m}$ , determinar a estaca e a cota do ponto mais baixo da curva 2 (extraído das notas de aula do professor Carlos Reynaldo Toledo Pimenta).



**Solução:** Cálculo da rampa intermediária:

$$M = (73 + 15,00) - (50 + 0,00) = 23 \text{ est} + 15,00 \text{ m} = 475 \text{ m}$$

$$L_1 = Rv_1 \cdot |g_1| = Rv_1 \cdot |i_1 - i_2| = 10000 \cdot (0,04 - i_2)$$

$$L_2 = Rv_2 \cdot |g_2| = Rv_2 \cdot |i_2 - i_3| = -5000 \cdot (i_2 - 0,05)$$

$$L_1/2 + L_2/2 = 475$$

$$\frac{-10000 \cdot (i_2 - 0,04)}{2} + \frac{5000 \cdot (0,05 - i_2)}{2} = 475 \quad \therefore \quad i_2 = -0,02 = -2\%$$

Estaca do PCV<sub>2</sub>:

$$L_2 = -5000 \cdot (i_2 - 0,05) = -5000 \cdot (-0,02 - 0,05) = 350 \text{ m}$$

$$E(PCV_2) = E(PIV_2) - [L_2/2] = (73+15,00) - (8+15,00) = 65 \text{ est} + 0,00 \text{ m}$$

Cálculo de L<sub>0</sub> para a curva 2 (equação 8.7a):

$$L_0 = \frac{i_2 \cdot L_2}{g_2} = \frac{-0,02 \cdot (350)}{-0,02 - 0,05} = 100,00 \text{ m}$$

Cálculo de y<sub>0</sub> para a curva 2 (equação 8.7b):

$$y_0 = \frac{i_2 \cdot L_2}{2g_2} = \frac{(-0,02)^2 \cdot 350}{2 \cdot (-0,02 - 0,05)} = -1,00 \text{ m} \quad (\text{cota em relação ao PCV}_2)$$

Cálculo da cota do ponto de mínimo (V) da curva 2:

$$L_1 = 10000 \cdot (0,04 + 0,02) = 600 \text{ m}$$

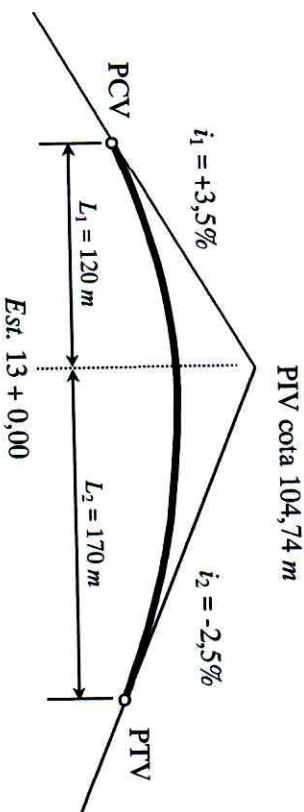
$$Cota(PCV_2) = Cota(PTV_1) - \frac{i_2 \cdot L_1}{2} = 500 - \frac{0,02 \cdot (600)}{2} = 494 \text{ m}$$

$$Cota(V) = Cota(PCV_2) + y_0 = 494,00 - 1,00 = 493,00 \text{ m}$$

Cálculo da estaca do ponto de mínimo da curva 2:

$$E(V) = E(PCV_2) + [L_0] = (65 + 0,00) + (5 + 0,00) = 70 + 0,00$$

**EXEMPLO 4:** Projetar a curva vertical assimétrica da figura abaixo.



**Solução:**

$$F = \frac{L_1 \cdot L_2}{2L} \cdot g = \frac{120 \cdot 170}{2 \cdot 290} \cdot (0,035 + 0,025) = 2,11 \text{ m}$$

1º Ramo:  $f' = \frac{F}{L_1^2} \cdot x_1^2$

$$f_{20} = \frac{2,11}{120^2} \cdot 20^2 = 0,06$$

$$f_{40} = \frac{2,11}{120^2} \cdot 40^2 = 0,23$$

$$f_{60} = \frac{2,11}{120^2} \cdot 60^2 = 0,53$$

$$f_{80} = \frac{2,11}{120^2} \cdot 80^2 = 0,94$$

$$f_{100} = \frac{2,11}{120^2} \cdot 100^2 = 1,46$$

2º Ramo:  $f'' = \frac{F}{L_2^2} \cdot x_2^2$

$$f_{30} = \frac{2,11}{170^2} \cdot 30^2 = 0,06$$

$$f_{50} = \frac{2,11}{170^2} \cdot 50^2 = 0,18$$

$$f_{70} = \frac{2,11}{170^2} \cdot 70^2 = 0,36$$

$$f_{90} = \frac{2,11}{170^2} \cdot 90^2 = 0,59$$

$$f_{110} = \frac{2,11}{170^2} \cdot 110^2 = 0,88$$

$$f_{130} = \frac{2,11}{170^2} \cdot 130^2 = 1,23$$

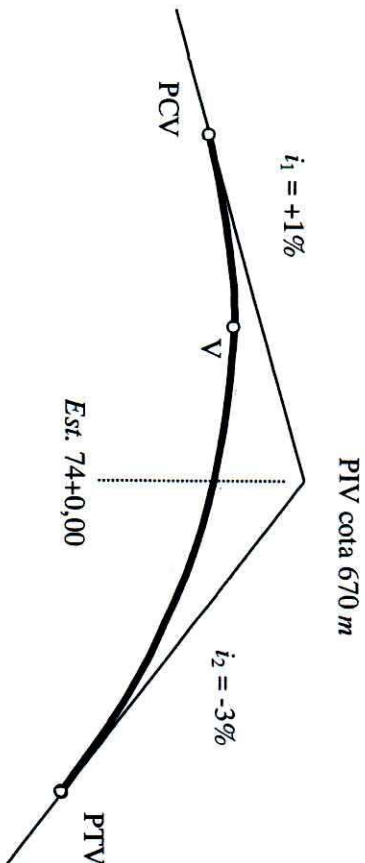
$$f_{150} = \frac{2,11}{170^2} \cdot 150^2 = 1,64$$

| ESTACA  | COTA   | f    | COTA FINAL |
|---------|--------|------|------------|
| 5       | 101,25 |      | 101,25     |
| 6       | 101,95 |      | 101,95     |
| 7=PCV   | 102,65 | 0,00 | 102,65     |
| 8       | 103,35 | 0,06 | 103,29     |
| 9       | 104,05 | 0,23 | 103,82     |
| 10      | 104,75 | 0,53 | 104,22     |
| 11      | 105,45 | 0,94 | 104,51     |
| 12      | 106,15 | 1,46 | 104,69     |
| 13=PIV  | 106,85 | 2,11 | 104,74     |
| 14      | 106,35 | 1,64 | 104,71     |
| 15      | 105,85 | 1,23 | 104,62     |
| 16      | 105,35 | 0,88 | 104,47     |
| 17      | 104,85 | 0,59 | 104,26     |
| 18      | 104,35 | 0,36 | 103,99     |
| 19      | 103,85 | 0,18 | 103,67     |
| 20      | 103,35 | 0,06 | 103,29     |
| 21      | 102,85 | 0,01 | 102,84     |
| +10=PTV | 102,60 | 0,00 | 102,60     |
| 22      | 102,35 |      | 102,35     |
| 23      | 101,85 |      | 101,85     |
| 24      | 101,35 |      | 101,35     |

**EXERCÍCIOS**

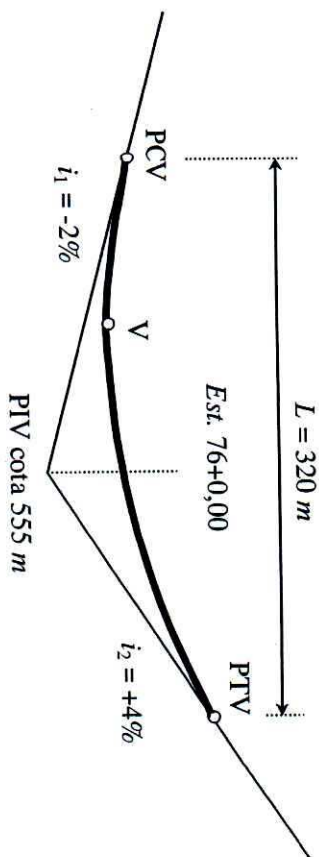
Os exercícios assinalados com (\*) foram cedidos pelo professor Carlos Reynaldo Toledo Pimenta, da Escola de Engenharia de São Carlos/USP.

1. Calcular os elementos notáveis (estacas e cotas do PCV, PTV e V) da curva abaixo e confeccionar a nota de serviço a seguir. O raio da curva vertical ( $R_v$ ) é igual a 4000 m e a distância de visibilidade de parada ( $D_p$ ) é igual a 112 m.

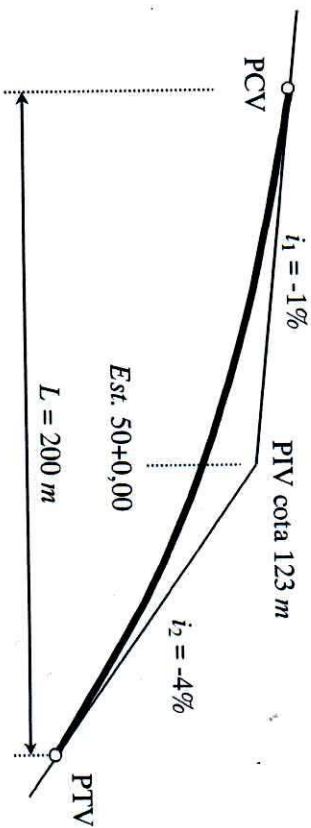


| ESTACA | COTAS DO GREIDE RETO | $f$ | COTAS DO GREIDE DE PROJETO |
|--------|----------------------|-----|----------------------------|
| PCV    |                      |     |                            |
|        |                      |     |                            |
|        |                      |     |                            |
|        |                      |     |                            |
|        |                      |     |                            |
|        |                      |     |                            |
|        |                      |     |                            |
|        |                      |     |                            |
| PTV    |                      |     |                            |

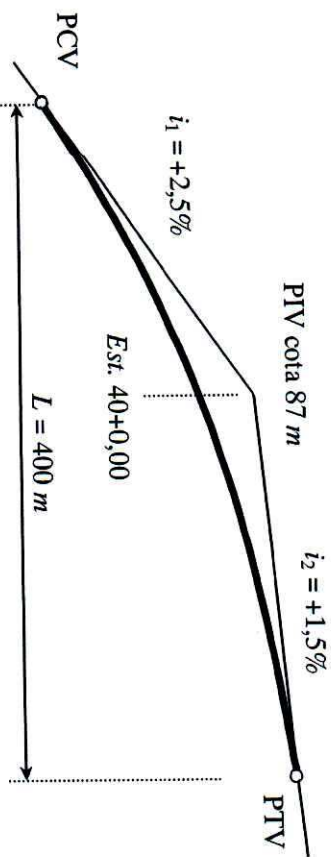
2. Calcular os elementos notáveis da curva vertical abaixo e confeccionar a nota de serviço.



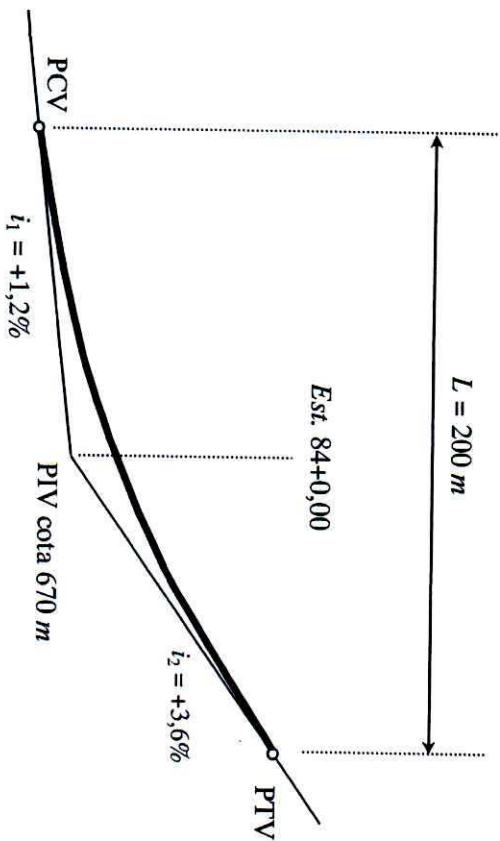
3. Idem para:



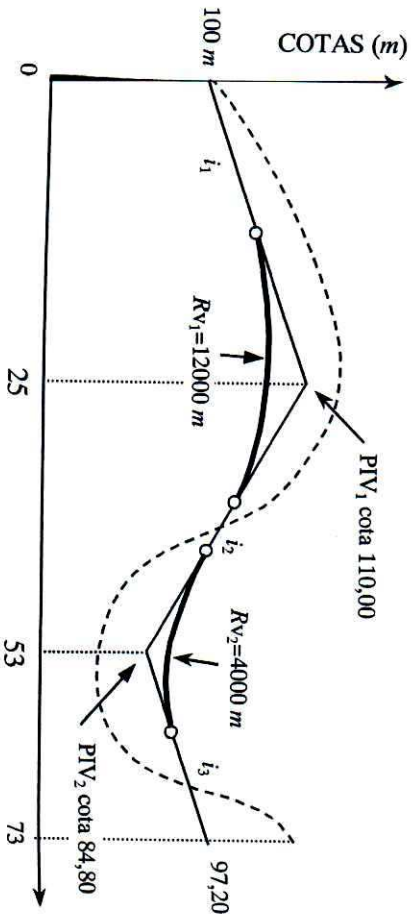
4. Idem para:



5. Calcular os elementos notáveis da curva vertical abaixo e confeccionar a nota de serviço.



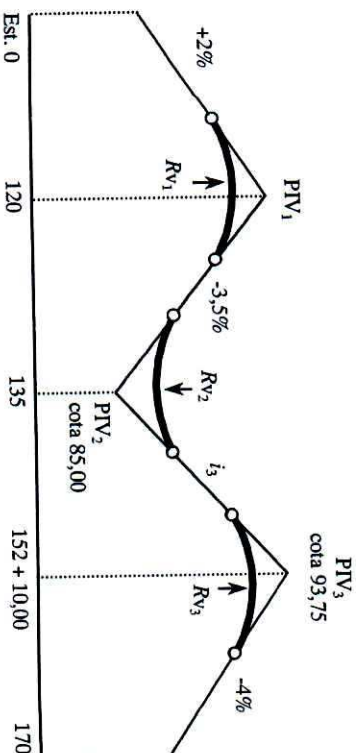
6. (\*) Calcular cotas e estacas dos PCV's, PTV's e vértices das curvas do perfil da figura abaixo.



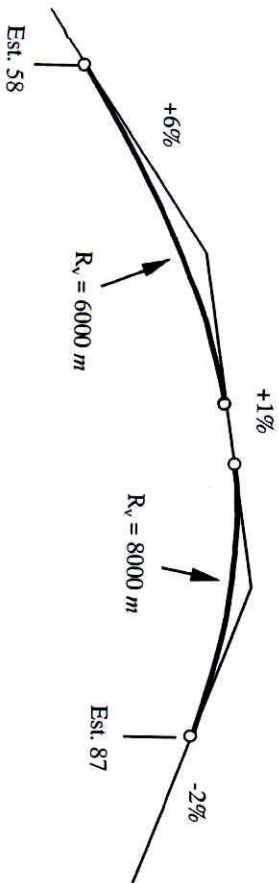
7. (\*) Construir a nota de serviço de terraplenagem do trecho correspondente à curva 2 do exemplo anterior.

| ESTACA          | COTAS DO GREIDE RETO | f | COTAS DO GREIDE DE PROJETO |
|-----------------|----------------------|---|----------------------------|
| PCV = 45+8,00   |                      |   |                            |
| 46              |                      |   |                            |
| 47              |                      |   |                            |
| 48              |                      |   |                            |
| 49              |                      |   |                            |
| 50              |                      |   |                            |
| 51              |                      |   |                            |
| 52              |                      |   |                            |
| PIV = 53 + 0,00 |                      |   |                            |
| 54              |                      |   |                            |
| V = 54 + 8,00   |                      |   |                            |
| 55              |                      |   |                            |
| 56              |                      |   |                            |
| 57              |                      |   |                            |
| 58              |                      |   |                            |
| 59              |                      |   |                            |
| 60              |                      |   |                            |
| PTV = 60+12,00  |                      |   |                            |

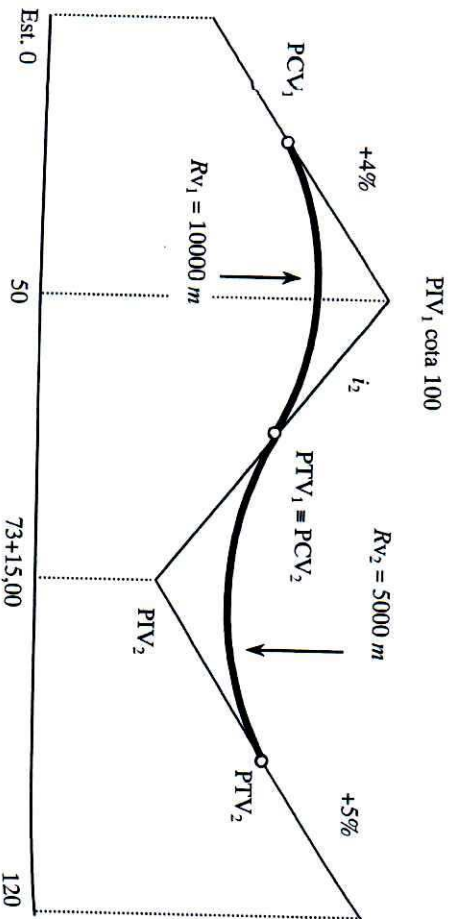
8. (\*) Dado o perfil longitudinal da figura, determinar um valor único para os raios  $Rv_1$ ,  $Rv_2$  e  $Rv_3$  de forma que este valor seja o maior possível.



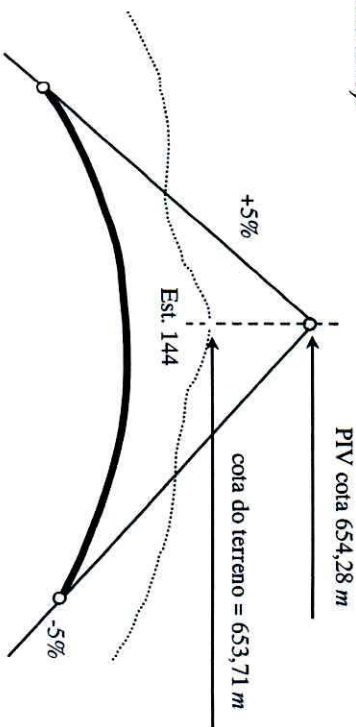
9. (\*) Dado o esquema da figura, deseja-se substituir as duas curvas dadas por uma única curva usando para ela o maior raio possível, sem que a curva saia do intervalo entre as estacas 58 e 87. Calcular  $R_v$  e a estaca do ponto PIV da nova curva.



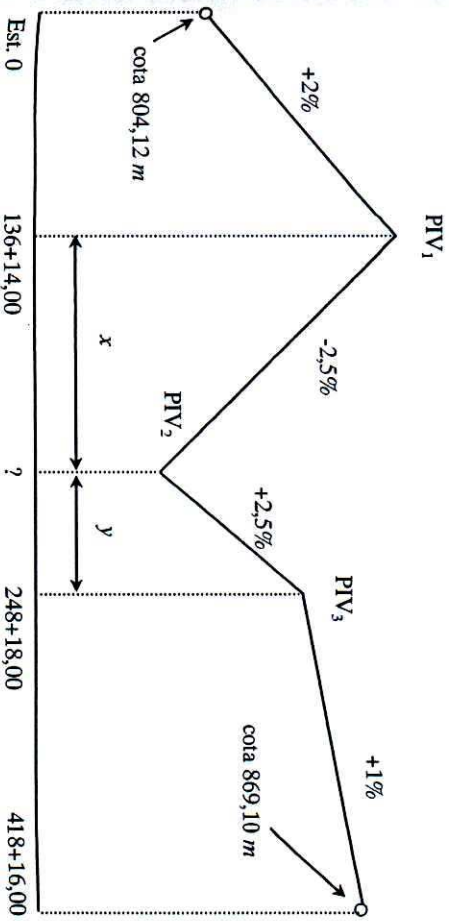
10. (\*) A figura mostra o perfil longitudinal de um trecho de estrada. Calcular o valor da rampa  $i_2$  para que os pontos  $PTV_1$  e  $PCV_2$  sejam coincidentes. Determinar as estacas e cotas do ponto mais alto da curva 1 e do ponto mais baixo da curva 2.



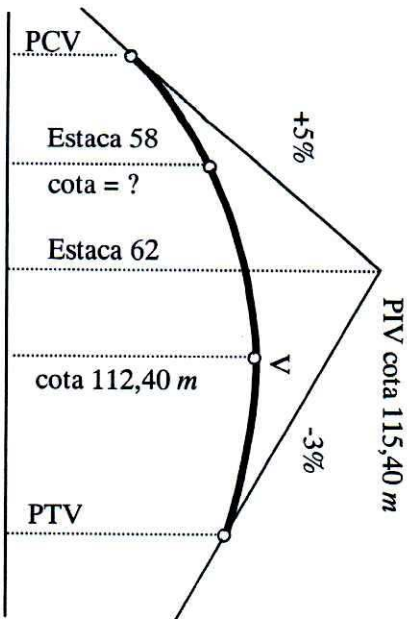
11. (\*) No esquema da figura, calcular a menor altura de corte possível na estaca 144 para uma estrada de pista dupla com velocidade de projeto  $V = 100 \text{ km/h}$ . Calcular também o raio da curva vertical e estacas dos pontos PCV e PTV da solução adotada (Calcular  $L_{\min}$  – condições recomendadas).



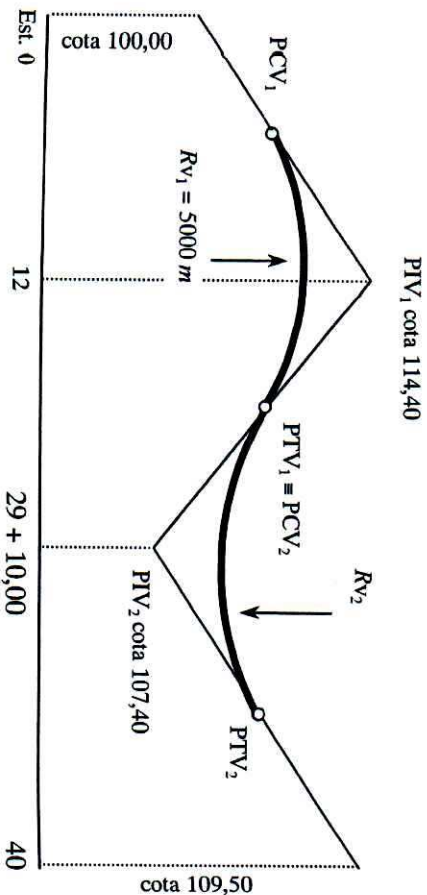
12. (\*) A figura mostra o perfil longitudinal de uma estrada onde as duas rampas intermediárias têm inclinação de  $-2,5\%$  e  $+2,5\%$ , respectivamente. Determinar estaca e cota do  $PIV_2$ .



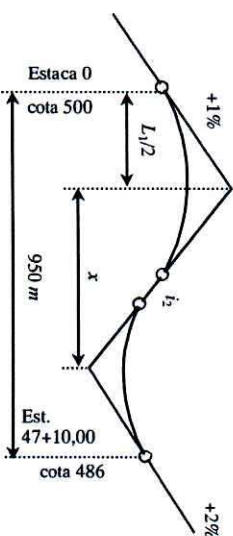
13. (\*) Uma curva vertical tem o PIV na estaca 62, sendo sua cota igual a 112,40 m. A cota do ponto mais alto do greide é 112,40 m. Calcular a cota na estaca 58.



14. (\*) No perfil longitudinal da figura, determinar o raio equivalente da curva vertical 2 ( $R_{v_2}$ ) de forma que os pontos  $PTV_1$  e  $PCV_2$  sejam coincidentes. Calcular também as cotas do greide da estrada nas estacas 27 e 31 e no ponto mais baixo da curva 2.



15. (\*) Dado o perfil longitudinal da figura, calcular a rampa  $i_2$  de forma que ela tenha a menor inclinação possível. Os raios mínimos das curvas verticais são iguais a 4000 m.



16. (\*) A figura 1 mostra o eixo da planta do ramo de um cruzamento e a figura 2 o perfil longitudinal do mesmo ramo. Adotando para a curva vertical convexa um raio  $R_v = 5000$  m, determinar o maior raio possível para a curva vertical côncava.

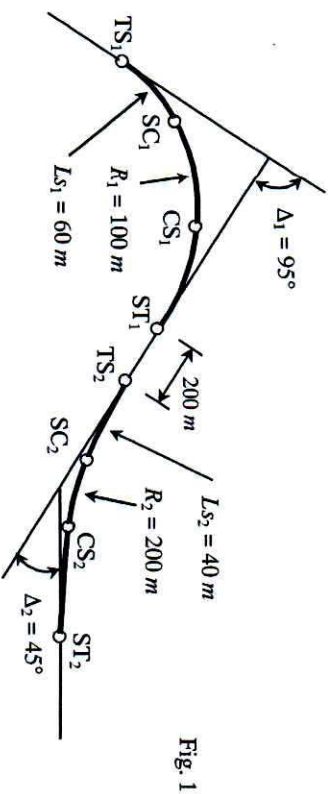


Fig. 1

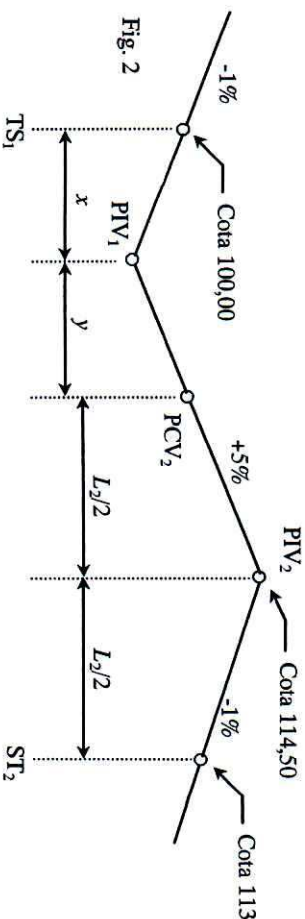


Fig. 2



17. Preencher a Nota de Serviço de Terraplenagem:

Dados: distância de visibilidade de parada = 60 m (verificar  $L_{min}$ )

cota do greide reto na estaca zero = 200,000 m

$E(PIV_1) = 9+0,00$      $E(PIV_2) = 18+0,00$      $L_1 = L_2 = 80$  m

$i_1 = -2,3\%$      $i_2 = +3,5\%$      $i_3 = -4,6\%$

| EST.  | ALINHAMENTOS |       | COTAS (m) |             | ORDENADAS DA PARÁBOLA |  | GREIDE DE PROJETO |  | COTAS VERMELHAS |            |
|-------|--------------|-------|-----------|-------------|-----------------------|--|-------------------|--|-----------------|------------|
|       | HORIZ.       | VERT. | TERRENO   | GREIDE RETO |                       |  |                   |  | CORTE (+)       | ATERRO (-) |
| 0     |              |       | 200,000   |             |                       |  |                   |  |                 |            |
| 1     |              |       | 199,200   |             |                       |  |                   |  |                 |            |
| 2     |              |       | 198,300   |             |                       |  |                   |  |                 |            |
| 3     |              |       | 197,450   |             |                       |  |                   |  |                 |            |
| +7,50 |              |       | 197,180   |             |                       |  |                   |  |                 |            |
| 4     | PCE          |       | 196,700   |             |                       |  |                   |  |                 |            |
| 5     |              |       | 195,200   |             |                       |  |                   |  |                 |            |
| 6     |              |       | 194,600   |             |                       |  |                   |  |                 |            |
| 7     |              |       | 194,000   |             |                       |  |                   |  |                 |            |
| 8     |              |       | 193,550   |             |                       |  |                   |  |                 |            |
| 9     |              |       | 193,000   |             |                       |  |                   |  |                 |            |
| 10    |              |       | 194,200   |             |                       |  |                   |  |                 |            |
| 11    |              |       | 195,500   |             |                       |  |                   |  |                 |            |
| 12    |              |       | 196,600   |             |                       |  |                   |  |                 |            |
| 13    |              |       | 197,800   |             |                       |  |                   |  |                 |            |
| 14    |              |       | 199,050   |             |                       |  |                   |  |                 |            |
| 15    |              |       | 200,300   |             |                       |  |                   |  |                 |            |
| +7,50 |              |       | 200,900   |             |                       |  |                   |  |                 |            |
| 16    | PT           |       | 201,800   |             |                       |  |                   |  |                 |            |
| 17    |              |       | 203,400   |             |                       |  |                   |  |                 |            |
| 18    |              |       | 204,150   |             |                       |  |                   |  |                 |            |
| 19    |              |       | 203,000   |             |                       |  |                   |  |                 |            |
| 20    |              |       | 201,850   |             |                       |  |                   |  |                 |            |
| 21    |              |       | 200,620   |             |                       |  |                   |  |                 |            |
| 22    |              |       | 199,450   |             |                       |  |                   |  |                 |            |
| 23    |              |       | 198,200   |             |                       |  |                   |  |                 |            |
| 24    |              |       | 196,300   |             |                       |  |                   |  |                 |            |
| 25    |              |       | 195,720   |             |                       |  |                   |  |                 |            |

18. Preencher a Nota de Serviço de Terraplenagem (extraído das notas de

aula do professor Carlos Alexandre Braz de Carvalho):

Dados:  $i_1 = 2,5\%$

$i_2 = -2\%$

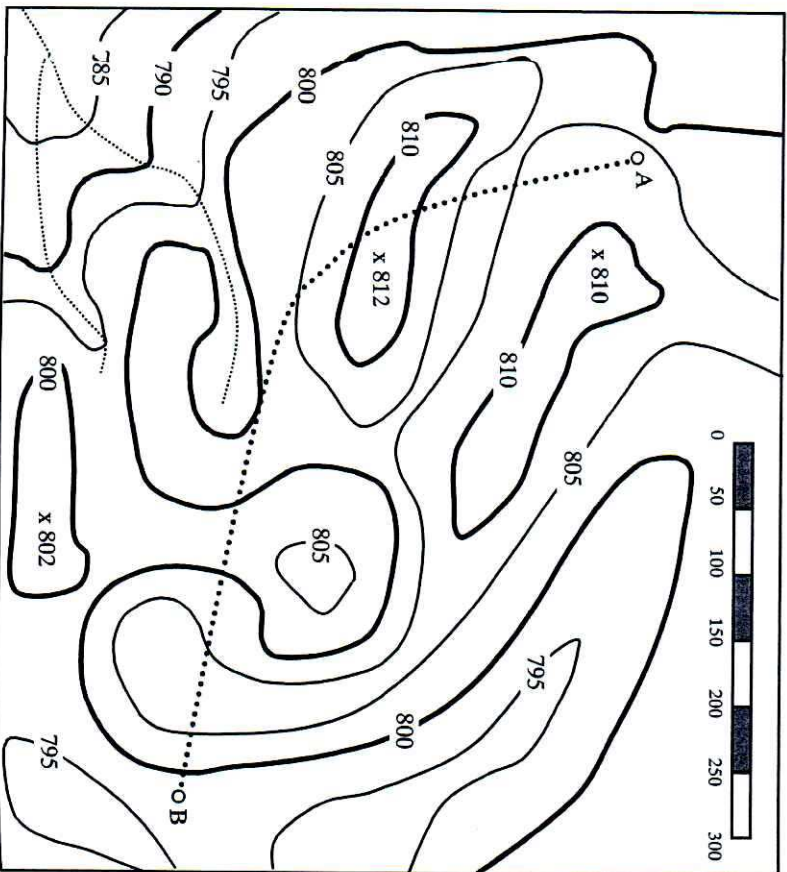
parábola simples

| EST. | FRAC | ALINHAMENTOS |       | COTAS (m) |             | f | GREIDE DE PROJETO | COTAS VERMELHAS |            |
|------|------|--------------|-------|-----------|-------------|---|-------------------|-----------------|------------|
|      |      | HORIZ.       | VERT. | TERRENO   | GREIDE RETO |   |                   | CORTE (+)       | ATERRO (-) |
| 30   |      |              |       | 103,415   |             |   |                   |                 |            |
|      | +10  |              |       | 104,785   |             |   |                   |                 |            |
| 31   |      |              |       | 104,914   |             |   |                   |                 |            |
|      | +10  |              |       | 105,112   |             |   |                   |                 |            |
| 32   |      |              |       | 105,222   |             |   |                   |                 |            |
|      | +10  |              |       | 105,317   |             |   |                   |                 |            |
| 33   |      |              |       | 105,419   |             |   |                   |                 |            |
|      | +10  |              |       | 105,613   |             |   |                   |                 |            |
| 34   |      |              |       | 105,712   |             |   |                   |                 |            |
|      | +10  |              |       | 105,801   |             |   |                   |                 |            |
| 35   |      |              |       | 105,903   | 103,500     |   |                   |                 |            |
|      | +10  |              |       | 105,793   |             |   |                   |                 |            |
| 36   |      |              |       | 105,685   |             |   |                   |                 |            |
|      | +10  |              |       | 105,417   |             |   |                   |                 |            |
| 37   |      |              |       | 105,335   |             |   |                   |                 |            |
|      | +10  |              |       | 105,127   |             |   |                   |                 |            |
| 38   |      |              |       | 104,295   |             |   |                   |                 |            |
|      | +10  |              |       | 104,015   |             |   |                   |                 |            |
| 39   |      |              |       | 103,970   |             |   |                   |                 |            |
|      | +10  |              |       | 103,950   |             |   |                   |                 |            |
| 40   |      |              |       | 103,550   |             |   |                   |                 |            |

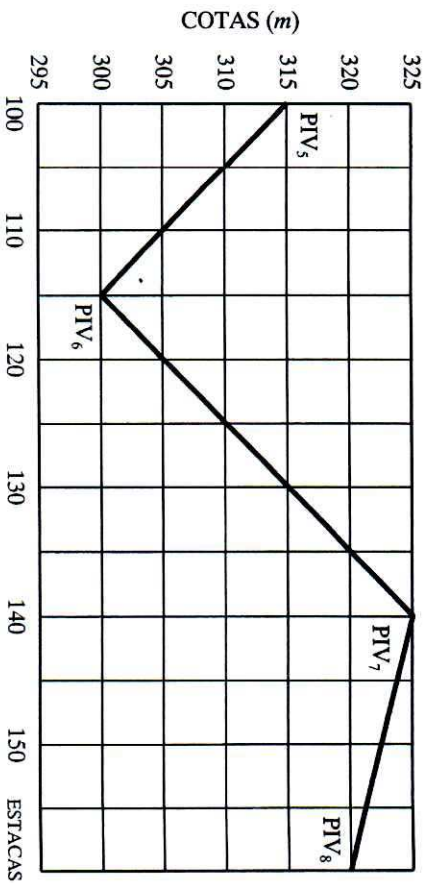
19. (Concurso DNER) Sabendo que os valores de  $L_1$  e  $L_2$  são 40 m e 60 m, respectivamente, a flecha de uma parábola composta, utilizada para concordar um perfil cujas rampas são +4,2% e -3,5%, tem o seguinte valor:

- a) 0,168 m      b) 0,924 m      c) 1,848 m      d) 3,850 m

20. Levantar o perfil longitudinal do alinhamento horizontal da figura (extraído das notas de aula do professor Creso Peixoto).



21. Calcular as declividades e os comprimentos das tangentes verticais da figura (extraído das notas de aula do professor Creso Peixoto).



22. Com relação aos dados da questão anterior, completar a tabela abaixo. Considerar o comprimento da curva vertical número 6 igual a 320 metros e o comprimento da curva número 7 igual a 400 metros. Calcular os raios das curvas.

| EST. | GREIDE RETO | ORDENADAS DA PARÁBOLA | GREIDE DE PROJETO |
|------|-------------|-----------------------|-------------------|
| 100  |             |                       |                   |
| 101  |             |                       |                   |
| ...  |             |                       |                   |
| 159  |             |                       |                   |
| 160  |             |                       |                   |

23. Desenhar o perfil longitudinal da estrada e do terreno, do ponto A ao ponto B. No trecho, o greide apresenta uma única rampa contínua com declividade de 5%. Determinar em planta a posição da embocadura e da desembocadura do túnel e das cabeceiras do viaduto a ser construído em seqüência ao túnel. Verificar se é possível interligar os pontos A e B somente com uma tangente (extraído das notas de aula do professor Creso Peixoto).

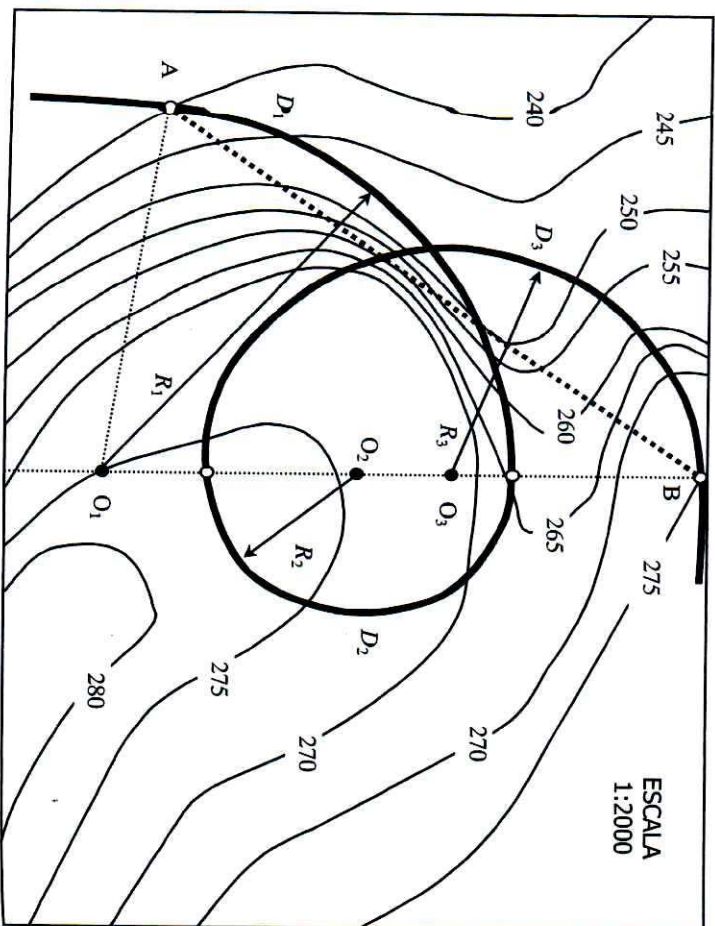
Dados:  $i_{\max} = 7\%$

$$R_1 = 124 \text{ m}$$

$$R_2 = 46 \text{ m}$$

$$R_3 = 76 \text{ m}$$

$$\Delta_1 = 83^\circ$$



## CAPÍTULO 9

# NOÇÕES DE TERRAPLENAGEM

*"Um País se faz com homens e terra."*

**MONTEIRO LOBATO**

Escritor brasileiro

## INTRODUÇÃO

Para o engenheiro projetista de estradas, uma das principais metas durante a elaboração de um projeto é encontrar uma solução que permita a construção da estrada com o menor movimento de terras possível, cumprindo, logicamente, as normas de um traçado racional.

O custo do movimento de terra é, na maioria dos projetos, significativo em relação ao custo total da estrada, sendo portanto um item importante a ser analisado. Nos locais onde os materiais de corte tiverem condições de serem usados nos aterros, o equilíbrio entre volumes de cortes e aterros, minimizando empréstimos e/ou bota-foras, acarreta em menores custos de terraplenagem.

O movimento de terras é uma ciência que engloba tanto o cálculo dos volumes a mover como os princípios de execução do trabalho. Estes últimos estão fora do escopo deste livro.

## CÁLCULO DE VOLUMES

Para o cálculo do volume de terra a mover numa estrada, é necessário supor que existe um determinado sólido geométrico cujo volume será facilmente calculado.

O método usual consiste em considerar o volume como proveniente de uma série de prismóides (sólidos geométricos limitados nos extremos por faces paralelas e lateralmente por superfícies planas). No campo, as faces paralelas correspondem às seções transversais extremas, e as superfícies planas laterais correspondem à plataforma da estrada, os taludes e a superfície do terreno natural. O volume do prismóide da figura 9.1 pode ser calculado mediante a fórmula:

$$V = \frac{L}{6} \cdot (A_1 + 4 \cdot A_m + A_2) \quad (9.1)$$

onde  $A_1$  e  $A_2$  são as áreas das seções transversais extremas,  $A_m$  é a área da seção transversal no ponto médio entre  $A_1$  e  $A_2$ , e  $L$  é a distância entre as seções  $A_1$  e  $A_2$ .

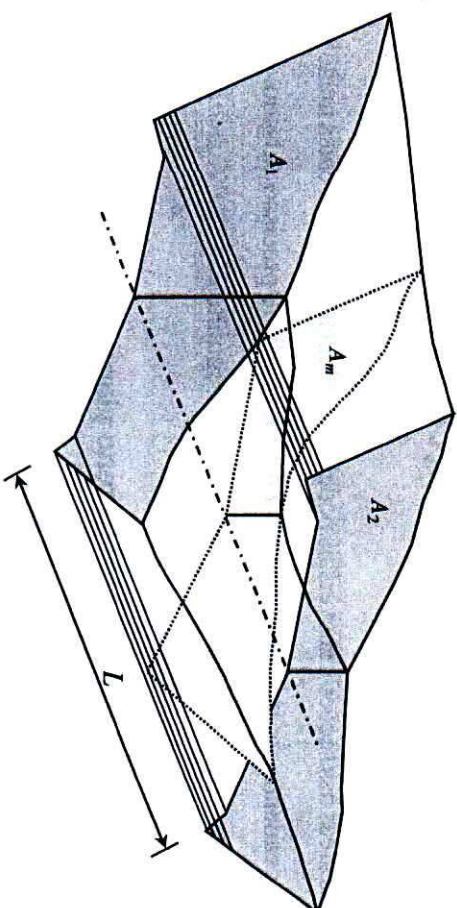


FIGURA 9.1 – Prismóide formado num tramo de rodovia  
(Fonte: CARCIENTE).

Uma fórmula aproximada comumente utilizada para o cálculo dos volumes dos prismóides é chamada *fórmula das áreas médias*. A fórmula é a seguinte:

$$V_m = \frac{L}{2} (A_1 + A_2) \quad (9.2)$$

Esta última equação se deduz da fórmula 9.1, substituindo  $A_m$  por  $(A_1 + A_2)/2$ . Obtem-se valores exatos para os volumes quando ambas seções transversais são iguais. Para outras condições, os resultados são ligeiramente diferentes. Na prática, o erro cometido é geralmente menor que 2%.

## CÁLCULO DAS ÁREAS DAS SEÇÕES TRANSVERSAIS

As áreas das seções transversais podem ser calculadas de diferentes maneiras, dependendo da topografia do terreno e do grau de precisão exigido. Entre os vários métodos, os mais usados são os seguintes.

### 1) Seções transversais em terreno plano

Para o caso de seções em corte ou aterro em terreno plano, a área da seção transversal é:

$$A = b \cdot h + 2 \cdot \frac{nh \cdot h}{2} = h \cdot (b + nh) \quad (9.3)$$

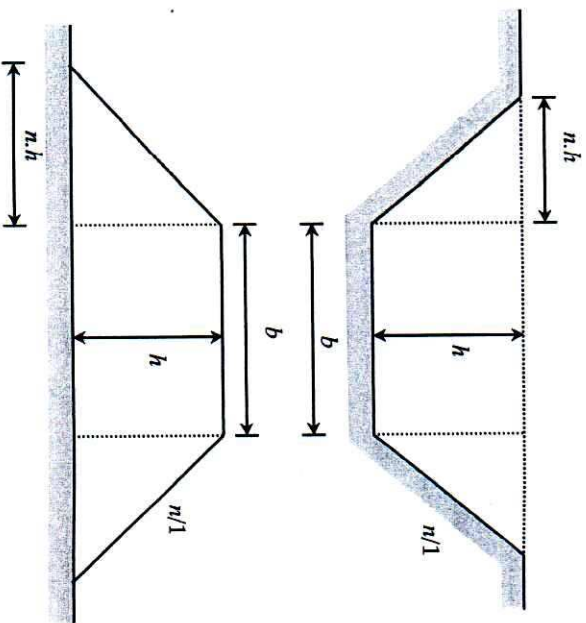


FIGURA 9.2 – Área de uma seção transversal num terreno plano.

### 2) Seção Mista

Quando a seção é mista, isto é, com áreas de corte e aterro, o processo mais prático para o cálculo das áreas baseia-se na divisão da seção em figuras geométricas conhecidas, tais como triângulos e trapézios.

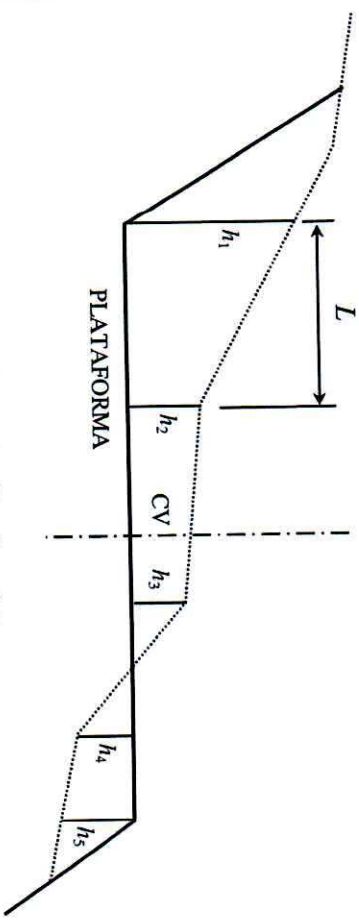


FIGURA 9.3 – Seção mista.

### 3) Método analítico

Se considera um polígono onde as coordenadas de seus vértices são  $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$ . A área do polígono é dada por:

$$A = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & \dots & x_n & x_1 \\ y_1 & y_2 & y_3 & \dots & y_n & y_1 \end{vmatrix} \quad (9.4)$$

Desenvolvendo, temos:

$$A = \frac{1}{2} [(x_1 y_2 + x_2 y_3 + \dots + x_n y_1) - (x_2 y_1 + x_3 y_2 + \dots + x_1 y_n)] \quad (9.5)$$

ou, de forma geral:

$$A = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^n y_n (x_{n+1} - x_{n-1}) \quad (9.6)$$

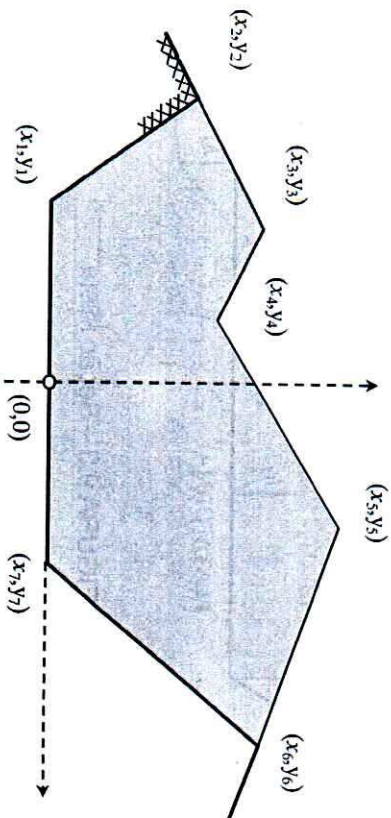


FIGURA 9.4 – Método analítico para cálculo de áreas.

#### 4) Planímetros

Os planímetros são instrumentos que servem para medir a área de uma figura, percorrendo o seu contorno com uma determinada parte do instrumento. O uso e manejo deste instrumento é dado na maioria dos livros de topografia.

#### DIAGRAMA DE MASSAS

O diagrama de massas, ou de Brückner, facilita sobremaneira a análise da distribuição dos materiais escavados. Essa distribuição corresponde a definir a origem e o destino dos solos e rochas objeto das operações de terraplenagem, com indicação de seus volumes, classificações e distâncias médias de transporte. Após calcular as áreas das seções transversais e os volumes dos prismóides, pode-se preparar uma tabela de volumes acumulados (tabela 9.1), que serve como base para construção do diagrama.

Para a construção do diagrama, calculam-se inicialmente as chamadas **Ordenadas de Brückner**. Estas ordenadas correspondem aos volumes de cortes (considerados positivos) e aterros (considerados negativos) acumulados sucessivamente. A somatória dos volumes é feita a partir de uma ordenada inicial arbitrária. Geralmente é escolhida uma ordenada suficientemente grande para evitar o aparecimento de ordenadas negativas.

No caso de seções mistas, a compensação lateral é obtida de forma automática quando do cálculo das ordenadas de Brückner, pois os volumes de corte e de aterro são considerados em cada seção, de forma que o acréscimo ou decréscimo nas ordenadas será dado pela diferença entre os dois volumes considerados. Pode-se dizer que a compensação lateral será

o menor dos dois volumes e que o volume disponível para compensação longitudinal, que afeta as ordenadas, será a diferença entre esses volumes.

As ordenadas calculadas são plotadas em papel milimetrado, de preferência sobre uma cópia do perfil longitudinal do projeto. No eixo das abscissas é colocado o estaqueamento e no eixo das ordenadas, numa escala adequada, os valores acumulados para as ordenadas de Brückner, seção a seção. Os pontos assim marcados, unidos por uma linha curva, formam o diagrama de Brückner.

TABELA 9.1 – Cálculo de volumes e ordenadas de Brückner.

| EST | ÁREAS |        | SOMA DAS ÁREAS |       | SEMI-DISTÂNCIA (m) | VOLUME |        | COMPENSAÇÃO LATERAL (m <sup>3</sup> ) | VOLUME ACUM. (m <sup>3</sup> ) |    |
|-----|-------|--------|----------------|-------|--------------------|--------|--------|---------------------------------------|--------------------------------|----|
|     | CORTE | ATERRO | AT. COR.       | CORTE |                    | CORTE  | ATERRO |                                       |                                |    |
| 1   | 2     | 3      | 4              | 5     | 6                  | 7      | 8      | 9                                     | 10                             | 11 |
|     |       |        |                |       |                    |        |        |                                       |                                |    |
|     |       |        |                |       |                    |        |        |                                       |                                |    |
|     |       |        |                |       |                    |        |        |                                       |                                |    |
|     |       |        |                |       |                    |        |        |                                       |                                |    |
|     |       |        |                |       |                    |        |        |                                       |                                |    |
|     |       |        |                |       |                    |        |        |                                       |                                |    |

**COLUNA 1:** estacas dos pontos onde foram levantadas as seções transversais. Normalmente são as estacas inteiras do traçado. Estacas fracionárias são utilizadas nos pontos de passagem (PP) ou quando o terreno é muito irregular.

**COLUNA 2:** áreas de corte, medidas nas seções.

**COLUNA 3:** áreas de aterro, medidas nas seções.

**COLUNA 4:** produto da coluna 3 pelo fator de homogeneização ( $F_h$ ).

**COLUNA 5:** soma das áreas de corte de 2 seções consecutivas na coluna 2.

**COLUNA 6:** soma das áreas de aterro de 2 seções consecutivas na coluna 4.

**COLUNA 7:** semi-distância entre seções consecutivas.

**COLUNA 8:** volumes de corte entre seções consecutivas.

**COLUNA 9:** volumes de aterro entre seções consecutivas.

**COLUNA 10:** volumes compensados lateralmente (não sujeitos a transporte longitudinal).

**COLUNA 11:** volumes acumulados, obtidos pela soma algébrica acumulada dos volumes obtidos nas colunas 8 e 9. Os volumes acumulados se colocam como ordenadas ao final da estaca.

A figura 9.5 mostra o perfil longitudinal de um trecho de estrada e o diagrama de massas correspondente.

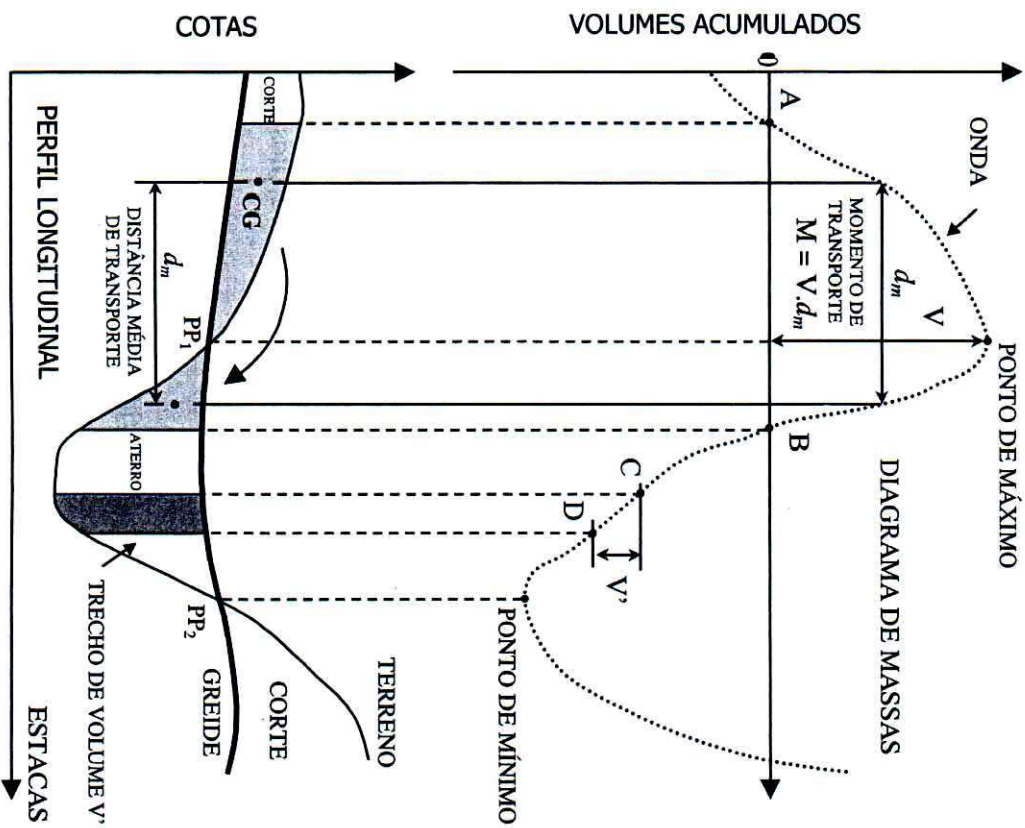


FIGURA 9.5 – Perfil longitudinal e diagrama de massas  
(Fonte: CARCIENTE).

## FATOR DE HOMOGENEIZAÇÃO DE VOLUMES

O fator de homogeneização ( $F_h$ ) é a relação entre o volume de material no corte de origem, e o volume de aterro compactado resultante. Na fase de anteprojeito este fator é em geral estimado. Um fator  $F_h = 1,4$  indica que será necessário escavar cerca de  $1,4 \text{ m}^3$  no corte para obter  $1 \text{ m}^3$  de aterro compactado (figura 9.6).

Na etapa de projeto,  $F_h$  pode ser avaliado pela relação abaixo:

$$F_h = \frac{\gamma_{\text{comp}}}{\gamma_{\text{score}}} \quad (9.7)$$

onde:

$\gamma_{\text{comp}}$  = massa específica aparente seca após compactação no aterro.

$\gamma_{\text{score}}$  = massa específica aparente seca do material no corte de origem.

O fator de homogeneização é aplicado sobre os volumes de aterro, como um multiplicador. Na prática, é utilizado um fator de segurança de 5%, de modo a compensar as perdas que ocorrem durante o transporte dos solos e possíveis excessos na compactação dos mesmos.

Logo, teremos:



$$F_h = 1,05 \cdot \frac{\gamma_{comp}}{\gamma_{scorte}}$$

(9.8)

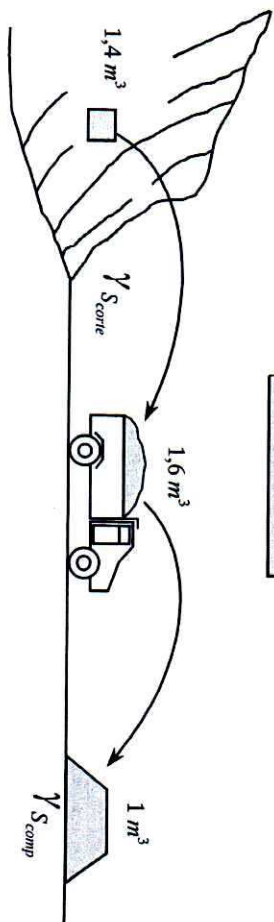


FIGURA 9.6 – Expansão e contração de solos durante a terraplenagem.

### PROPRIEDADES DO DIAGRAMA DE MASSAS

Da figura 9.5 podemos deduzir as seguintes propriedades:

1. O diagrama de massas não é um perfil. A forma do diagrama de massas não tem nenhuma relação com a topografia do terreno.
2. Inclinações muito elevadas das linhas do diagrama indicam grandes movimentos de terras.
3. Todo trecho ascendente do diagrama corresponde a um trecho de corte (ou predominância de cortes em seções mistas).
4. Todo trecho descendente do diagrama corresponde a um trecho de aterro (ou predominância de aterros em seções mistas).

5. A diferença de ordenadas entre dois pontos do diagrama mede o volume de terra entre esses pontos.
6. Os pontos extremos do diagrama correspondem aos pontos de passagem (PP).
7. Pontos de máximo correspondem à passagem de corte para aterro.
8. Pontos de mínimo correspondem à passagem de aterro para corte.
9. Qualquer horizontal traçada sobre o diagrama determina trechos de volumes compensados (volume de corte=volume de aterro corrigido). Esta horizontal, por conseguinte, é chamada de linha de compensação (ou linha de terra). A medida do volume é dada pela diferença de ordenadas entre o ponto máximo ou mínimo do trecho compensado e a linha horizontal de compensação.
10. A posição da onda do diagrama em relação à linha de compensação indica a direção do movimento de terra. Ondas positivas (linha do diagrama acima da linha de compensação), indicam transporte de terra no sentido do estaqueamento da estrada. Ondas negativas indicam transporte no sentido contrário ao estaqueamento da estrada.
11. A área compreendida entre a curva de Brückner e a linha de compensação mede o momento de transporte da distribuição considerada.

12. A distância média de transporte de cada distribuição pode ser considerada como a base de um retângulo de área equivalente à do segmento compensado e de altura igual à máxima ordenada deste segmento (figura 9.7).

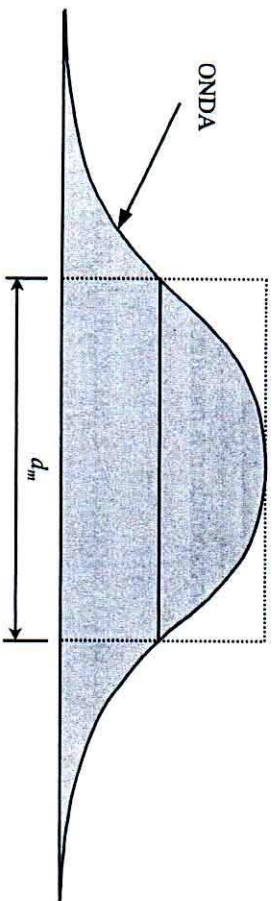


FIGURA 9.7 – Onda de Brückner.

Para a determinação da posição do Ponto de Passagem (PP) entre duas seções, procede-se da seguinte maneira (vide figura 9.8):

$$\frac{d_1}{d_2} = \frac{h_a}{h_c}$$

$$\frac{d_1}{d_1 + d_2} = \frac{h_a}{h_a + h_c}$$

$$d_1 = d \cdot \frac{h_a}{h_a + h_c}$$

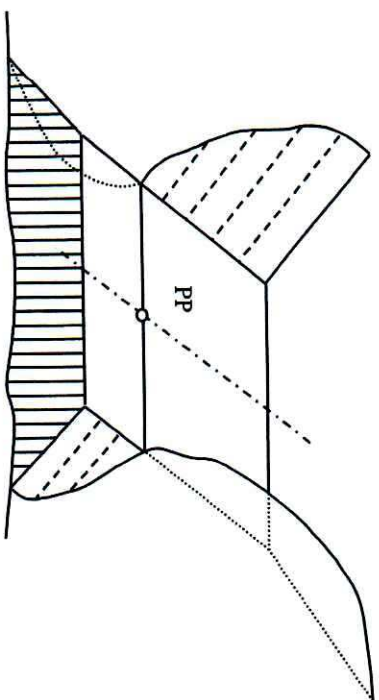
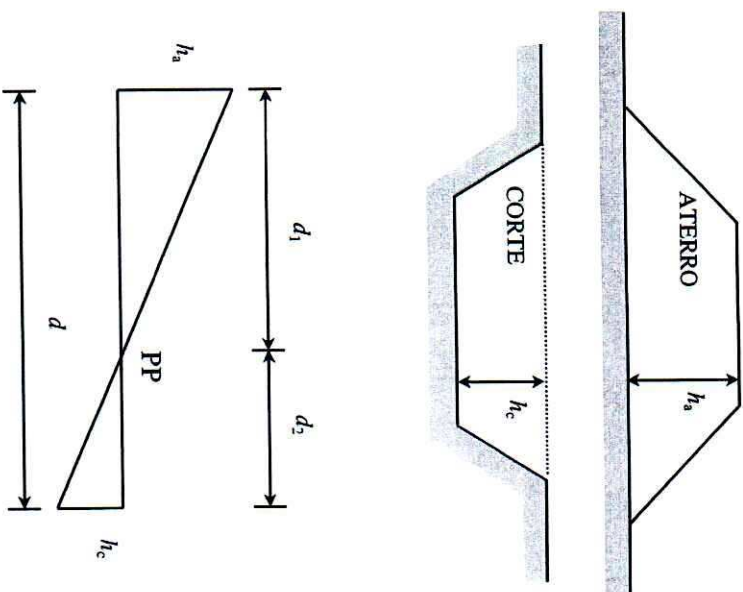


FIGURA 9.8 – Determinação do ponto de passagem (PP).

## MOMENTO DE TRANSPORTE

Define-se *Momento de Transporte* como o produto dos volumes transportados pelas distâncias médias de transporte, da seguinte maneira:

$$M = V \cdot d_m \quad (9.9)$$

onde:

$M$  = momento de transporte, em  $m^3 \cdot dam$  ou  $m^3 \cdot km$ .

$V$  = volume natural do solo, em  $m^3$ .

$d_m$  = distância média de transporte, em  $dam$  ou  $km$ .

Quando é executado um transporte de solo de um corte para um aterro, as distâncias de transporte se alteram a cada viagem sendo necessária, portanto, a determinação de uma distância média de transporte, que deverá ser igual à distância entre os centros de gravidade dos trechos de corte e aterros compensados.

Existem várias maneiras de se executar uma distribuição de terras na terraplenagem. A cada uma das alternativas corresponderá uma distância média de transporte global e, por conseguinte, um determinado custo de terraplenagem.

Logo, um projeto racional de terraplenagem deverá indicar a melhor distribuição de terras, de maneira que a distância média de transporte e o custo das operações de terraplenagem sejam reduzidos a valores mínimos.

O método mais utilizado para estimativa das distâncias médias de transporte entre trechos compensados é o método do Diagrama de Brückner. Como visto anteriormente, o método nos fornece meios simplificados para o cálculo de  $d_m$ , da seguinte maneira: toma-se a metade da altura da onda e traça-se uma horizontal nesta altura. A distância média de transporte é a distância entre os pontos de interseção desta reta com o diagrama, medida na escala horizontal do desenho. O momento de transporte é igual à área da onda de Brückner, que pode ser estimada pelo produto da altura da onda ( $V$ ) pela distância média de transporte ( $d_m$ ), como mostra a figura 9.9.

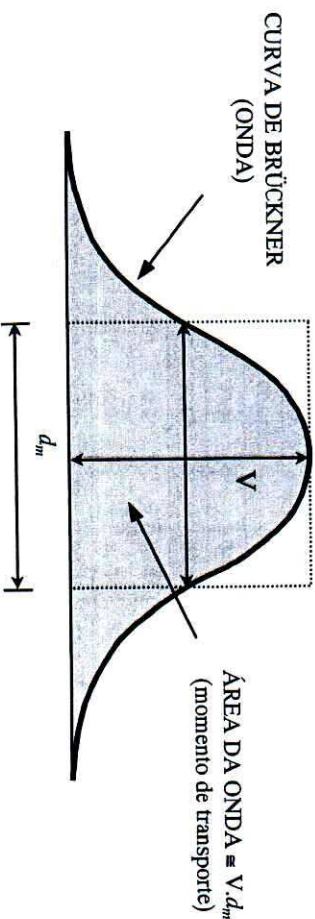
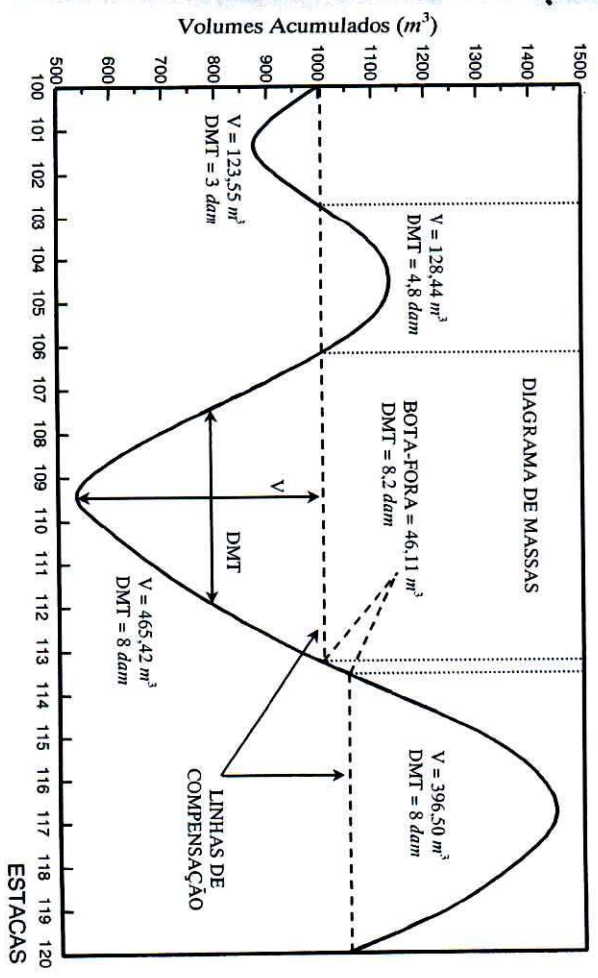
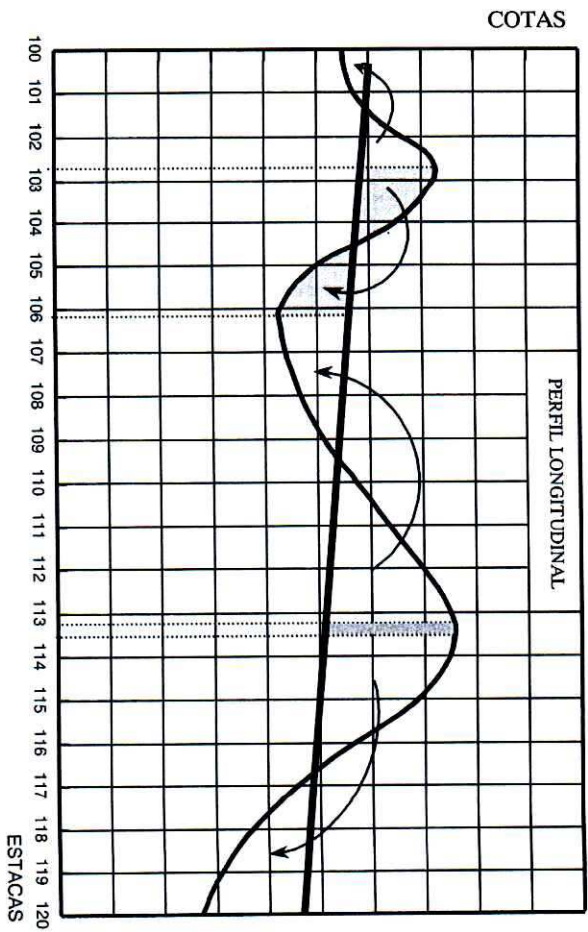


FIGURA 9.9 – Momento de transporte.

**EXEMPLO:** Dada a tabela de volumes acumulados abaixo, construir o Diagrama de Brückner. Calcular os volumes de corte e aterro e as distâncias médias de transporte (extraído do Manual Básico de Estradas Vicinais, do DER/SP).

| EST | ÁREAS (m <sup>2</sup> ) |        | SOMA DAS ÁREAS (m <sup>2</sup> ) |        | SEMI-DISTÂNCIA (m) | VOLUME (m <sup>3</sup> ) |        | COMPENS. LATERAL (m <sup>3</sup> ) | VOLUMES ACUM. (m <sup>3</sup> ) |
|-----|-------------------------|--------|----------------------------------|--------|--------------------|--------------------------|--------|------------------------------------|---------------------------------|
|     | CORTE                   | ATERRO | CORTE                            | ATERRO |                    | CORTE                    | ATERRO |                                    |                                 |
| 100 |                         | 4,74   | 6,64                             |        |                    |                          |        |                                    | 1.000,00                        |
| 101 |                         | 3,12   | 4,37                             |        | 10,00              |                          | 110,10 |                                    | 889,90                          |
| +5  | 0,48                    | 0,72   | 1,01                             |        | 2,50               |                          | 13,45  |                                    | 876,45                          |
| 102 | 5,01                    |        |                                  | 5,49   | 7,50               |                          | 41,18  |                                    | 917,63                          |
| 103 | 6,92                    |        |                                  | 11,93  | 10,00              |                          | 119,30 |                                    | 1.036,93                        |
| 104 | 1,63                    | 0,58   | 0,81                             | 8,55   | 10,00              |                          | 85,50  |                                    | 1.122,43                        |
| +17 | 0,28                    | 0,52   | 0,73                             | 1,91   | 8,50               |                          | 19,10  |                                    | 1.128,44                        |
| 105 |                         | 1,82   | 2,55                             |        | 1,50               |                          | 4,92   |                                    | 1.123,52                        |
| 106 |                         | 5,16   | 7,22                             |        | 10,00              |                          | 97,70  |                                    | 1.025,82                        |
| 107 |                         | 6,08   | 8,51                             |        | 10,00              |                          | 157,30 |                                    | 868,52                          |
| 108 | 1,00                    | 6,52   | 9,13                             |        | 10,00              |                          | 176,40 |                                    | 692,12                          |
| 109 | 2,00                    | 5,26   | 7,36                             | 3,00   | 10,00              | 30,00                    | 164,90 | 30,00                              | 557,22                          |
| +9  | 2,60                    | 1,62   | 2,27                             | 4,60   | 4,50               | 20,70                    | 43,34  | 20,70                              | 534,58                          |
| 110 | 4,46                    |        |                                  | 7,06   | 5,50               |                          | 38,83  |                                    | 573,41                          |
| 111 | 6,03                    |        |                                  | 10,49  | 10,00              |                          | 104,9  |                                    | 678,31                          |
| 112 | 6,42                    |        |                                  | 12,45  | 10,00              |                          | 124,50 |                                    | 802,81                          |
| 113 | 8,64                    |        |                                  | 15,06  | 10,00              |                          | 150,60 |                                    | 953,41                          |
| 114 | 9,66                    |        |                                  | 18,30  | 10,00              |                          | 183,00 |                                    | 1.136,41                        |
| 115 | 8,02                    | 0,62   | 0,87                             | 17,88  | 10,00              |                          | 176,80 |                                    | 1.313,21                        |
| 116 | 5,07                    | 1,20   | 1,68                             | 13,09  | 10,00              | 130,90                   | 25,50  | 25,50                              | 1.418,61                        |
| 117 | 2,4                     | 2,42   | 3,39                             | 7,47   | 10,00              | 74,70                    | 50,70  | 50,70                              | 1.442,61                        |
| 118 |                         | 3,30   | 4,62                             |        | 10,00              |                          | 80,10  |                                    | 1.362,51                        |
| 119 |                         | 5,80   | 8,12                             |        | 10,00              |                          | 127,40 |                                    | 1.235,11                        |
| 120 |                         | 7,70   | 10,78                            |        | 10,00              |                          | 189,00 |                                    | 1.046,11                        |

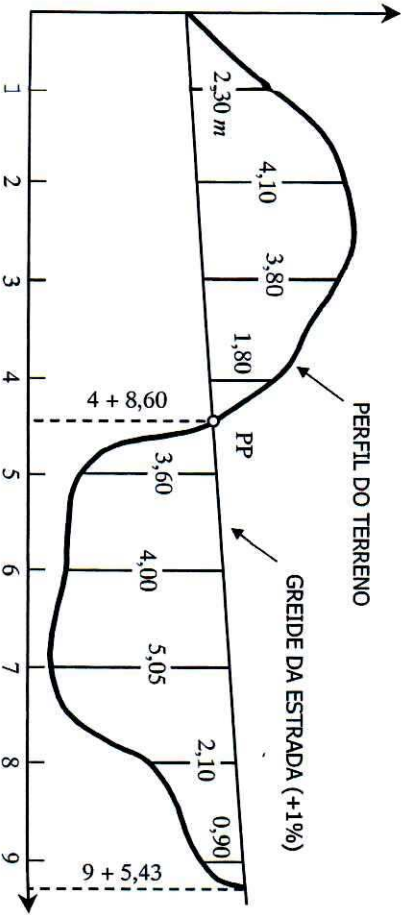
PERFIL LONGITUDINAL E DIAGRAMA DE MASSAS



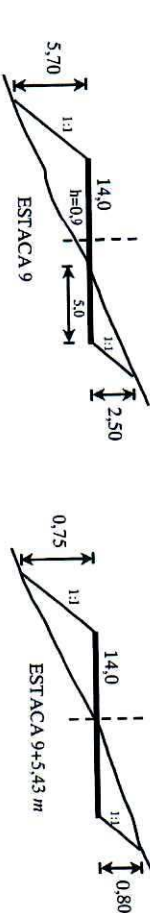
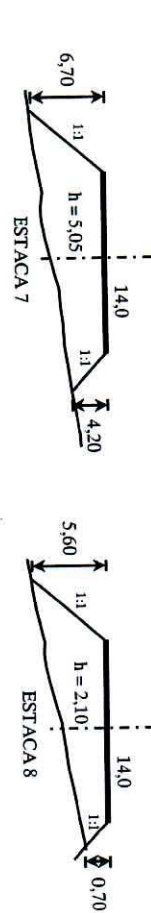
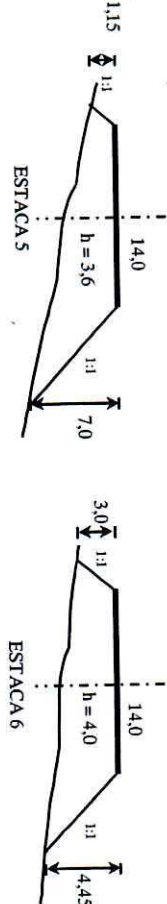
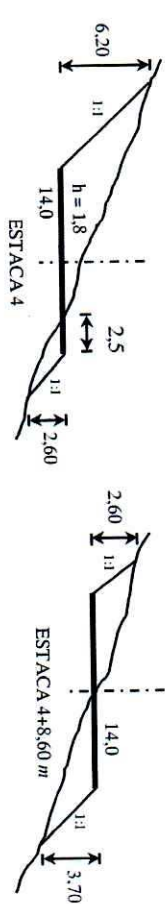
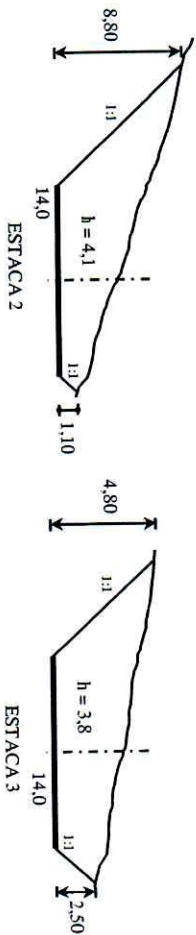
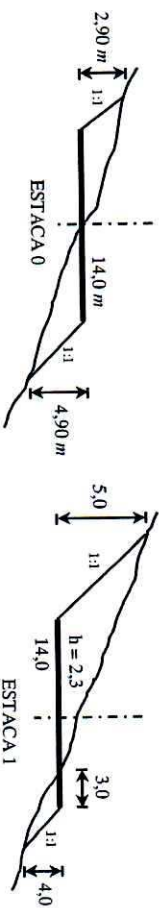
**EXERCÍCIOS**

Os exercícios assinalados com (\*) foram cedidos pelo professor Carlos Reynaldo Toledo Pimenta, da Escola de Engenharia de São Carlos/USP.

1. (\*) Dado o trecho de estrada da figura abaixo e suas seções transversais, determinar as quantidades de escavação, volume de aterro compactado e o momento total de transporte. Considerar  $F_h = 1,1$  e DMT para empriésimo e/ou bota-fora = 10,2 dam.



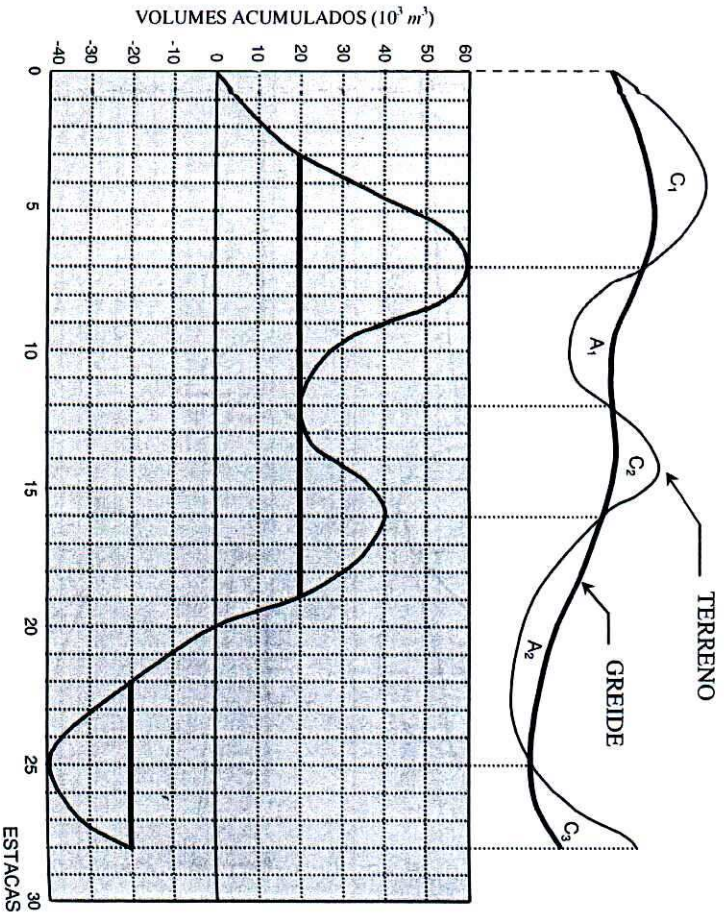
| EST   | ÁREAS (m <sup>2</sup> ) |        | VOLUMES (m <sup>3</sup> ) |        |                |               |               |                |           |
|-------|-------------------------|--------|---------------------------|--------|----------------|---------------|---------------|----------------|-----------|
|       | Corte                   | Aterro | Corte                     | Aterro | Aterro Cortiço | Comp. Lateral | Corte (Long.) | Aterro (Long.) | Acumulado |
| 0     |                         |        |                           |        |                |               |               |                |           |
| 1     |                         |        |                           |        |                |               |               |                |           |
| 2     |                         |        |                           |        |                |               |               |                |           |
| 3     |                         |        |                           |        |                |               |               |                |           |
| 4     |                         |        |                           |        |                |               |               |                |           |
| 5     |                         |        |                           |        |                |               |               |                |           |
| 6     |                         |        |                           |        |                |               |               |                |           |
| 7     |                         |        |                           |        |                |               |               |                |           |
| 8     |                         |        |                           |        |                |               |               |                |           |
| 9     |                         |        |                           |        |                |               |               |                |           |
| +8,40 |                         |        |                           |        |                |               |               |                |           |
| +5,43 |                         |        |                           |        |                |               |               |                |           |



2. (\*) Com relação ao movimento de terra da figura, calcular:

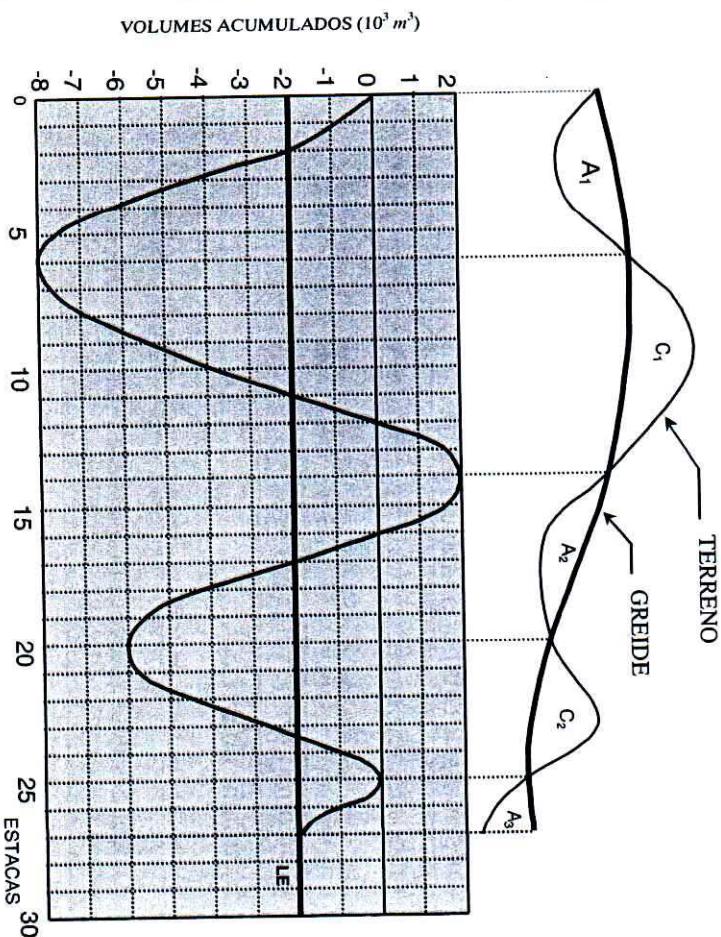
- volume total a ser escavado (incluindo empréstimos e/ou BF).
- volume de bota-fora e/ou empréstimo.
- momento total de transporte, em  $m^3 \cdot dam$  (considerar eventuais empréstimos ou bota-foras a uma DMT de 150 m).
- volume de corte  $C_1$  e volume de aterro  $A_2$ .

Obs.: Considerar todo trecho ascendente compensando trecho descendente.



3. (\*) Para execução do movimento de terra da figura, foi escolhida para

- linha de equilíbrio (LE) a horizontal tracejada da figura. Sabendo-se que os eventuais bota-foras e/ou empréstimos terão uma distância de transporte de 10 dam, calcular:
- quantos  $m^3$  serão transportados do corte  $C_1$  para o aterro  $A_1$ .
  - volume do corte  $C_1$ .
  - volume total a ser escavado para a execução dos serviços.
  - momento de transporte total, em  $m^3 \cdot dam$



4. (Concurso DNER) Num corte feito em material argiloso, foram obtidas três seções transversais, distantes uma da outra 20 metros. Calculadas as áreas, obteve-se, respectivamente,  $S_1 = 125 \text{ m}^2$ ,  $S_2 = 257 \text{ m}^2$  e  $S_3 = 80 \text{ m}^2$ . O volume de material escavado nestas seções é:

a)  $4.799,333 \text{ m}^3$     b)  $7.190 \text{ m}^3$     c)  $9.240 \text{ m}^3$     d)  $14.380 \text{ m}^3$

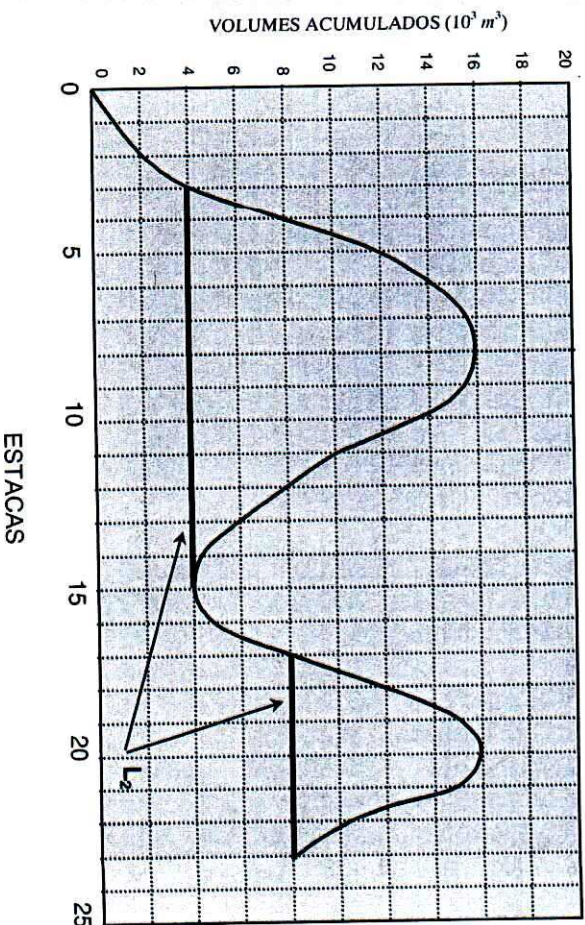
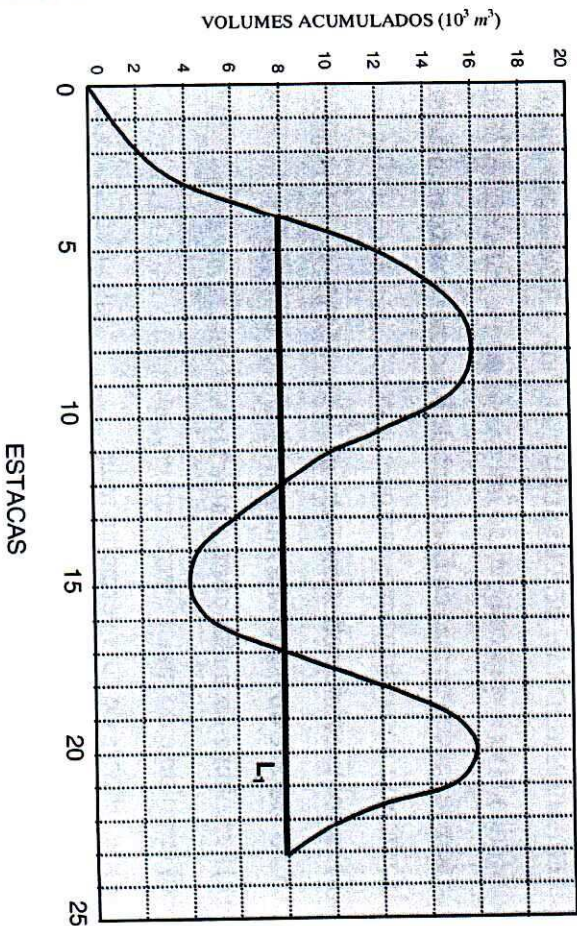
5. (Concurso DNER) Considerando que, numa seção de aterro, a cota vermelha é de  $4,02 \text{ m}$ , a declividade do terreno da esquerda para a direita é de  $+12\%$  e os taludes de aterro são de 2:3 (V:H), a distância para a marcação do *offset* de uma estaca, à direita, é:

a)  $8,905 \text{ m}$     b)  $9,680 \text{ m}$     c)  $9,710 \text{ m}$     d)  $11,042 \text{ m}$

6. (\*) A figura mostra o perfil longitudinal e o diagrama de massas de um trecho de estrada. Para a execução da terraplenagem foram escolhidas duas linhas de equilíbrio (linhas 1 e 2 das figuras). Para as duas soluções propostas, responder:

- volume total de corte, em  $\text{m}^3$ .
- volume do aterro  $A_1$ .
- momento total de transporte para cada uma das linhas.
- qual das duas soluções propostas é mais econômica?

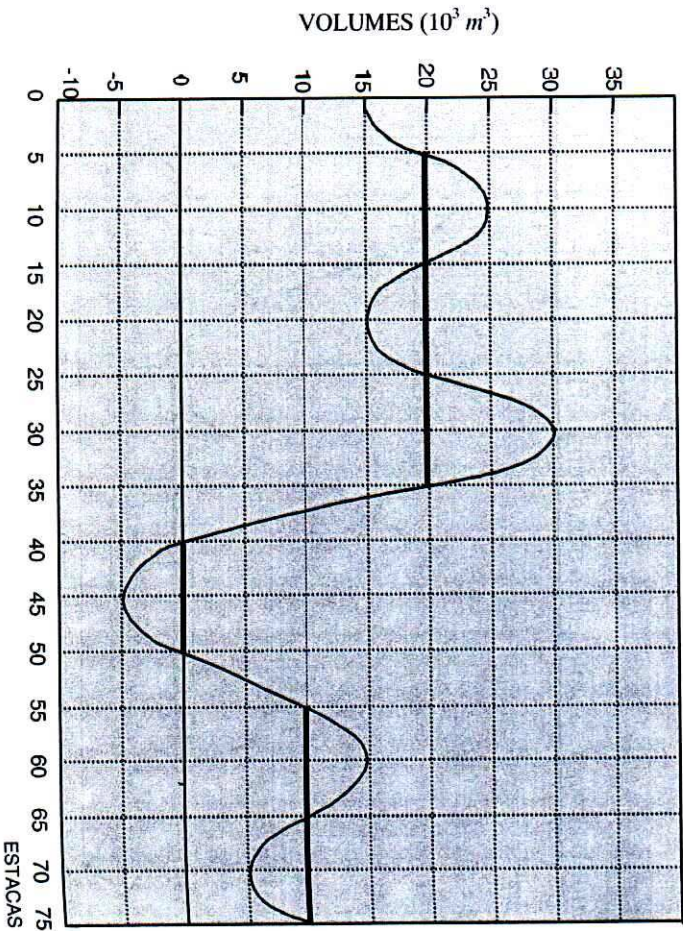
Dado: DMT para bota-fora e/ou empréstimo =  $300 \text{ m}$ .



7. (EXAME NACIONAL DE CURSOS-1997) Para a realização do projeto detalhado de terraplenagem no intervalo entre as estacas 0 e 75 de uma rodovia, lançou-se mão do Diagrama de Brückner abaixo esquematizado.

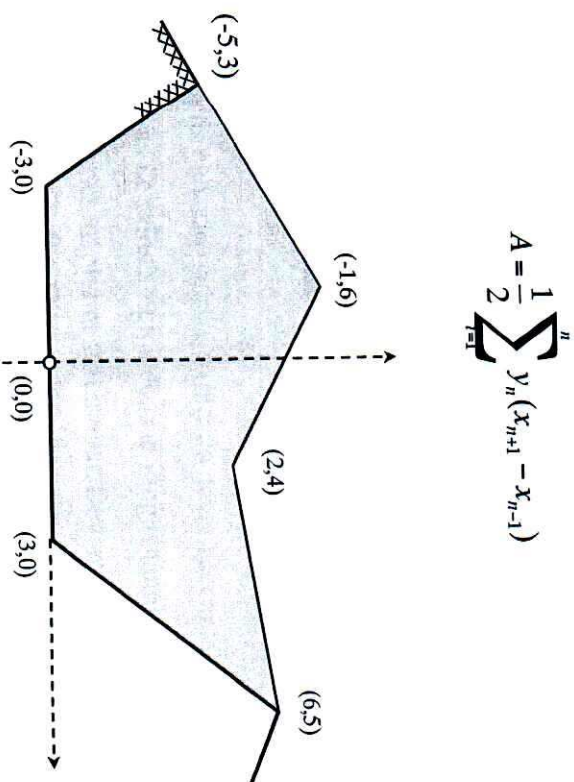
Com base nesse diagrama, indique:

- o volume do empréstimo, em  $m^3$ .
- o volume do botá-fora, em  $m^3$ .
- o volume do maior corte, em  $m^3$ .
- o volume do maior aterro, em  $m^3$ .
- as estacas de cota vermelha nula.



8. (Concurso DNER) Ao invés de recuperar uma camada de base da Rodovia DF-025, o engenheiro fiscal, depois de consultar o projetista, decidiu substituir toda a camada, usando o cascalho laterítico. Após a estabilização desse cascalho, mediu-se um volume de  $2.000 m^3$ . O transporte do cascalho foi feito por caminhão basculante com capacidade de  $5 m^3$ . Sabendo-se que a densidade do cascalho compactado é de  $2,035 t/m^3$ , a densidade natural é de  $1,430 t/m^3$  e a densidade solta é de  $1,10 t/m^3$ , calcular o total de viagens necessárias para transportar todo o volume de cascalho.

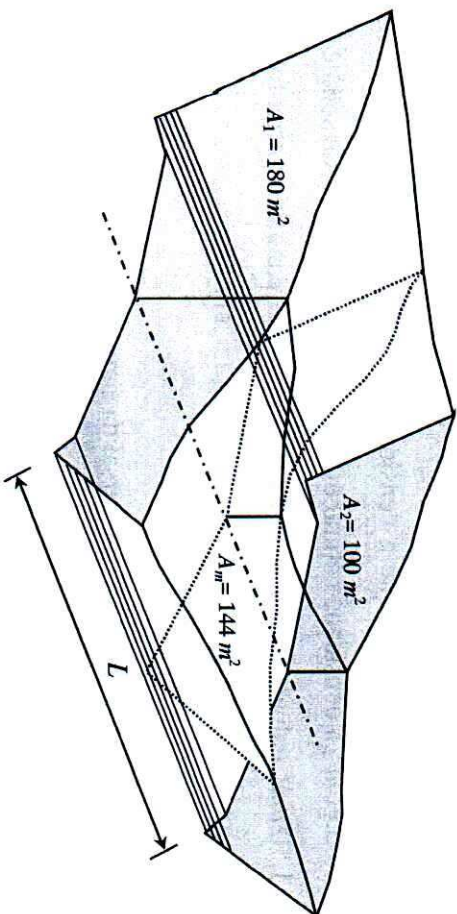
9. Calcular a área da seção transversal da figura.





10. Calcular o volume do prismóide.

$$V = \frac{L}{6} \cdot (A_1 + 4 \cdot A_m + A_2)$$



11. Com relação à questão anterior, qual o erro cometido se o volume fosse calculado pela fórmula das áreas médias  $V = L \cdot (A_1 + A_2) / 2$ ?

## CAPÍTULO 10

# ALINHAMENTOS HORIZONTAL E VERTICAL

*"Somos juntos, descontínuos e relativos."*

**ALBERT EINSTEIN**  
Cientista alemão

## ALINHAMENTO HORIZONTAL

O alinhamento horizontal de uma estrada é composto basicamente de trechos retos concordados por curvas, e deverá ser coerente com a topografia da região. Um alinhamento fluente, bem ajustado à topografia, é desejável do ponto de vista estético, construtivo e de manutenção.

Para rodovias de elevado padrão, o traçado deverá ser antes uma sequência de poucas curvas de raios amplos do que longas tangentes quebradas por curvas de pequeno desenvolvimento circular. Devem ser evitados, na medida do possível, trechos em tangente excessivamente longos. Segundo o DNER, um critério que pode ser usado limita a extensão das tangentes a um

percurso de 1,5 minutos percorrido à velocidade diretriz  $V$ , ou seja,  $T = 25 \cdot V$ , com  $T$  em metros e  $V$  em  $km/h$ . Esta configuração reduz a sensação de monotonia para o motorista e problemas de ofuscamento noturno, além de ajustar-se mais favoravelmente à topografia, podendo reduzir os movimentos de terra causados pela terraplenagem.

A seguir, apresentamos algumas das principais recomendações do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), relativas ao alinhamento horizontal de rodovias:

- É indesejável a existência de duas curvas sucessivas no mesmo sentido quando entre elas existir um curto trecho em tangente, pois a maioria dos motoristas não espera a existência de uma outra curva no mesmo sentido. De preferência, serão substituídas por uma única curva longa ou, pelo menos, a tangente intermediária deverá ser substituída por um arco circular, formando-se, então, uma curva composta. Desta maneira, evita-se uma grande diferença de curvatura entre os raios. Sendo impossível adotar essas medidas, a extensão  $T$  da tangente intermediária deverá ser superior ao percurso de aproximadamente 15 segundos percorrido à velocidade diretriz  $V$ , ou seja:

$$T > 4V \quad (T \text{ em } m, V \text{ em } km/h)$$

- Curvas de transição sucessivas em sentidos opostos deverão ter suas extremidades coincidentes ou separadas por extensões curtas em tangente. No caso de curvas reversas sem espiral, o comprimento mínimo da tangente intermediária deverá permitir a transição da superelevação em qualquer hipótese.

- A escolha inadequada do traçado em planta é causa de acidentes, limitação da capacidade de tráfego da estrada e aumento do custo de operação, além de causar má aparência do ponto de vista estético. O traçado deve ser o mais uniforme e homogêneo possível.

- Curvas fechadas no fim de longas tangentes são pontos potenciais de acidentes. O mesmo ocorre com curvas de raios muito diferentes dos raios das demais curvas.

- Para ângulos centrais pequenos as curvas devem ter grandes raios de forma que os seus desenvolvimentos não sejam muito pequenos, a fim de evitar a aparência de dobras.

- Qualquer mudança brusca no traçado deve ser evitada. Curvas dotadas de raios muito grandes ( $> 5.000 m$ ) apresentam dificuldades para serem percorridas e seu uso deverá ser evitado.

As curvas devem ter desenvolvimentos maiores que 150 m, para ângulos centrais de 5°, e seus comprimentos devem ser aumentados de 30 m para cada grau de aumento do ângulo central.

Curvas sucessivas, por considerações operacionais e de aparência, deverão desejaravelmente manter um inter-relacionamento, de modo a evitar variações abruptas de curvatura, situação que pode surpreender e confundir o motorista.

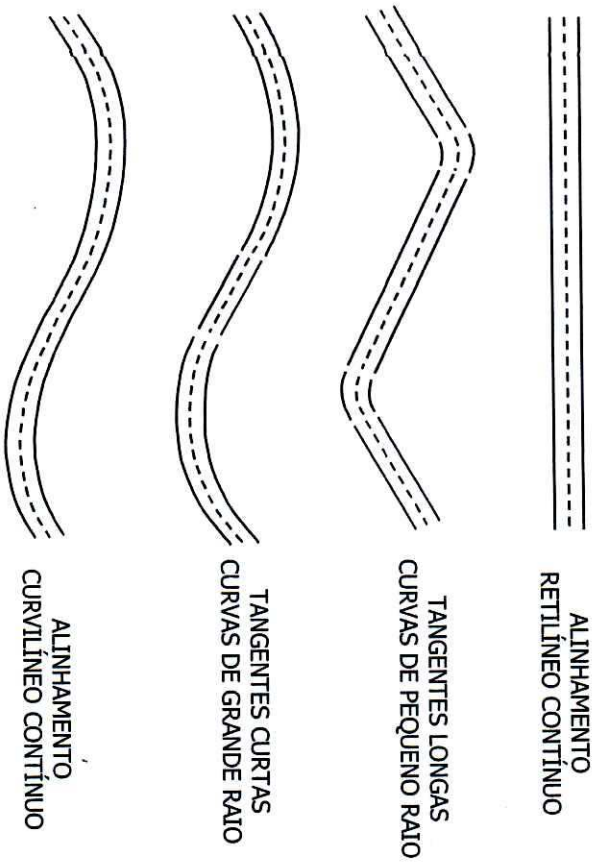


FIGURA 10.1 – Alinhamento horizontal de uma estrada.

Um critério desejável e que pode ser usado para orientar a escolha dos raios de curvas sucessivas encontra-se resumido na figura 10.2.

- ZONA I – Sucessão desejável
- ZONA II – Sucessão boa
- ZONA III – Sucessão aceitável
- ZONA IV – Sucessão a evitar quando possível

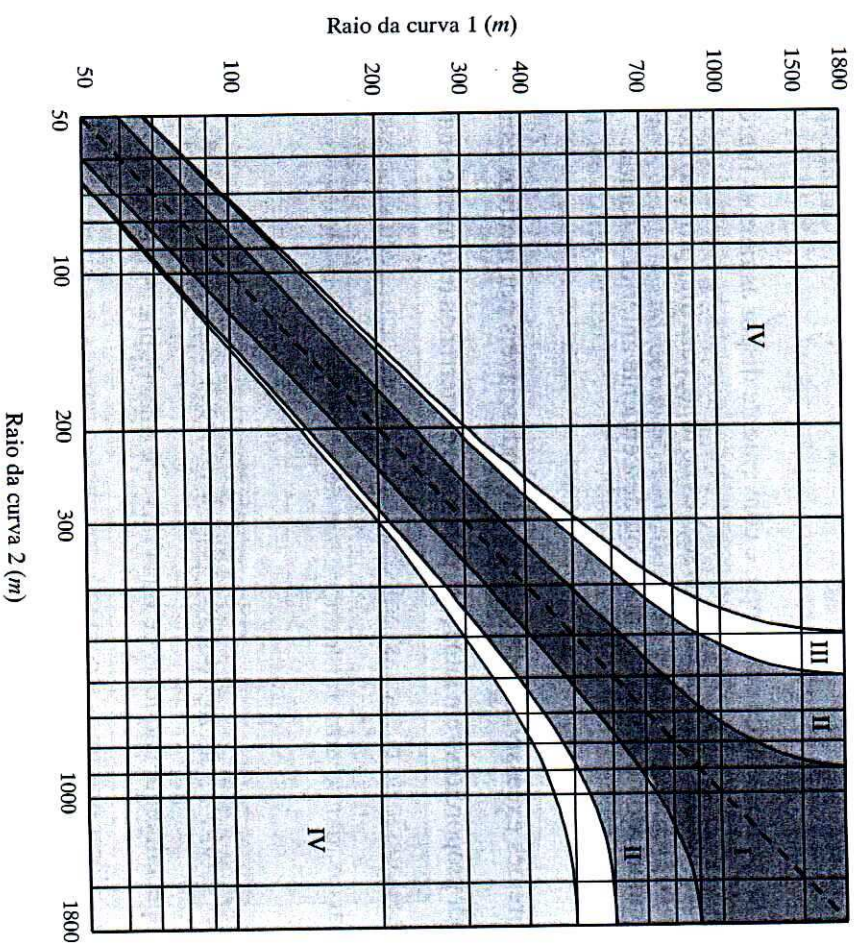


FIGURA 10.2 – Escolha de raios de curvas sucessivas (Fonte: DNER).

## ALINHAMENTO VERTICAL

O projeto do greide deve evitar freqüentes alterações de menor vulto nos valores das rampas. Estas deverão ser tão contínuas quanto possível. Deverão ser evitadas sempre que possível curvas verticais no mesmo sentido separadas por pequenas extensões de rampa.

Em trechos longos em rampa, é conveniente dispor as rampas íngremes na parte inferior e as rampas mais suaves no topo, para tirar proveito do impulso acumulado no segmento plano ou descendente anterior à subida.

Greides excessivamente colados são indesejáveis por motivos estéticos e por proporcionarem situações perigosas em terrenos levemente ondulados. A sucessão de pequenas lombadas e depressões oculta veículos nos pontos baixos, dando uma falsa impressão de oportunidade de ultrapassagem.

As rampas têm grande influência sobre a capacidade das rodovias, especialmente naquelas de duas faixas e mão dupla. A tabela 10.1 resume os valores máximos recomendados para as rampas das diferentes classes de rodovias. Obviamente, o uso das rampas máximas deve ser limitado a casos especiais.

O uso de trechos em nível ( $i = 0\%$ ) não apresenta problemas desde que o pavimento tenha uma inclinação transversal suficiente para um bom escoamento das águas superficiais.

Entretanto, em trechos em corte, o uso de rampas com declividade nula cria problemas para a execução dos dispositivos necessários ao escoamento da água superficial.

Nos casos usuais, o greide mínimo nos trechos em corte é de 0,5%. Para pavimentos de alta qualidade e execução cuidadosa, pode-se admitir o greide mínimo dos cortes de 0,35%.

TABELA 10.1 – Rampas máximas (%).

| CLASSE DE PROJETO | RELEVO             |                    |                    |
|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
|                   | PLANO              | ONDULADO           | MONTANHOSO         |
| 0                 | 3                  | 4                  | 5                  |
| I                 | 3                  | 4,5                | 6                  |
| II                | 3                  | 5                  | 6-7                |
| III               | 3-4 <sup>(1)</sup> | 5-6 <sup>(1)</sup> | 7-8 <sup>(1)</sup> |
| IV-A              | 4                  | 6                  | 8                  |
| IV-B              | 6                  | 8                  | 10 <sup>(2)</sup>  |

1. Valor máximo absoluto

Fonte: DNER

2. A extensão de rampas acima de 8% será desejavelmente limitada a 300 m contínuos

## FAIXAS AUXILIARES PARA VEÍCULOS LENTOS EM RAMPAS

### COMPRIMENTO CRÍTICO DE RAMPA

Entre as recomendações gerais do traçado em perfil, inclui-se também a implantação de faixa adicional para veículos carregados nas rampas ascendentes cujo comprimento seja superior ao comprimento crítico de rampa, desde que o volume de tráfego e a porcentagem de caminhões pesados justifiquem o seu custo. Define-se *comprimento crítico de rampa* como sendo o comprimento máximo no qual um caminhão carregado pode operar sem grandes perdas de velocidade.

O uso de comprimentos de rampa não superiores ao comprimento crítico garantem o escoamento de tráfego em boas condições. Porém, quando é necessário o uso de um comprimento de rampa maior, deve o projetista procurar soluções que evitem que a capacidade de tráfego da estrada fique abaixo de valores desejáveis.

A implantação de 3ª faixa nas rampas para veículos lentos pode constituir-se em solução de boa relação custo/benefício, mantendo em toda a extensão da estrada o mesmo nível de serviço. Tal solução pode afastar ou adiar por muitos anos melhoramentos como aumento de faixas e duplicação de pistas, que geralmente são onerosos.

Trechos de estradas com sucessão de rampas muito curtas devem ser evitados, pois criam a necessidade de um grande número de curvas verticais e problemas de visibilidade de ultrapassagem que acabam por diminuir sensivelmente a capacidade de tráfego da estrada. Por outro lado, o comprimento máximo de uma rampa não pode ser fixado previamente, pois em regiões montanhosas muitas vezes a topografia exige o uso de rampas com vários quilômetros de extensão.

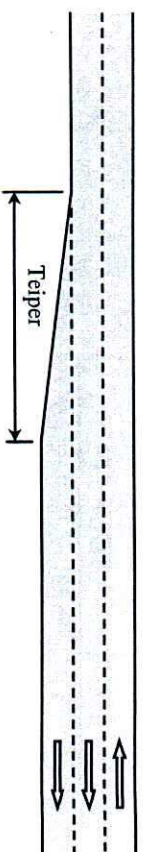


FIGURA 10.3 – Terceira faixa.

Em geral, a implantação de uma terceira faixa deve ser considerada quando forem satisfeitas duas condições: a) o comprimento crítico for excedido, ou seja, quando o comprimento da rampa causar uma redução de 25 km/h ou mais na velocidade de caminhões carregados; b) constatação de que o volume horário de projeto (VHP) supera a capacidade da rampa. O segundo item está fora do escopo deste livro.

É desejável que o início de uma terceira faixa seja precedido por um teiper (figura 10.5) com comprimento de no mínimo 50 metros. A faixa deverá ser estendida além da crista da rampa até um ponto tal que um caminhão-tipo possa atingir uma velocidade mínima admissível para sua reentrada no

Fluxo normal, seguida de um teijper de 60 m. A escolha das larguras a adotar para as terceiras faixas dependerá do bom senso do projetista, bem como o padrão técnico geral da rodovia nos demais segmentos (vide figura 10.11).

A figura 10.4 mostra as curvas de perda de velocidade para um caminhão-tipo de 20 t, para o caso em que a rampa ascendente é precedida por um trecho horizontal retilíneo e a velocidade de entrada na rampa é de 80 km/h.

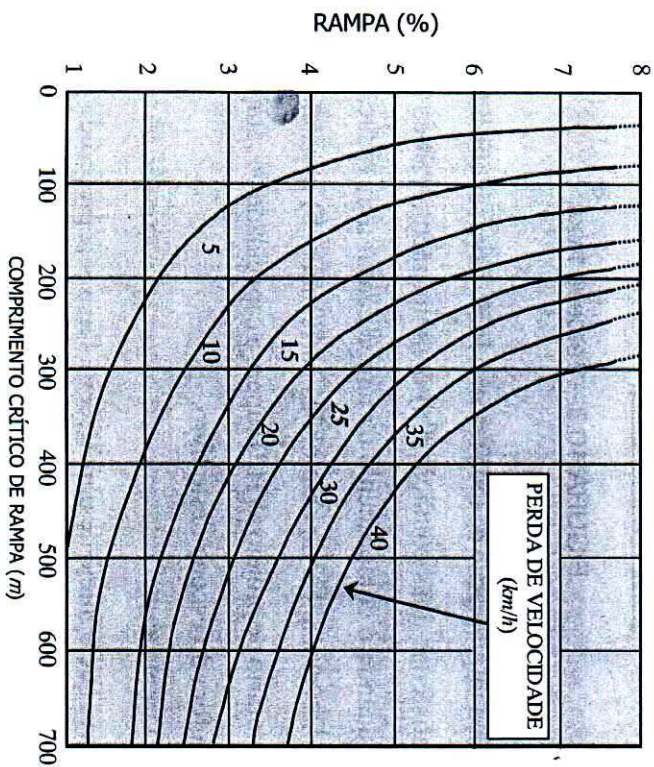


FIGURA 10.4 – Comprimento crítico de rampa para caminhões de 20 t.

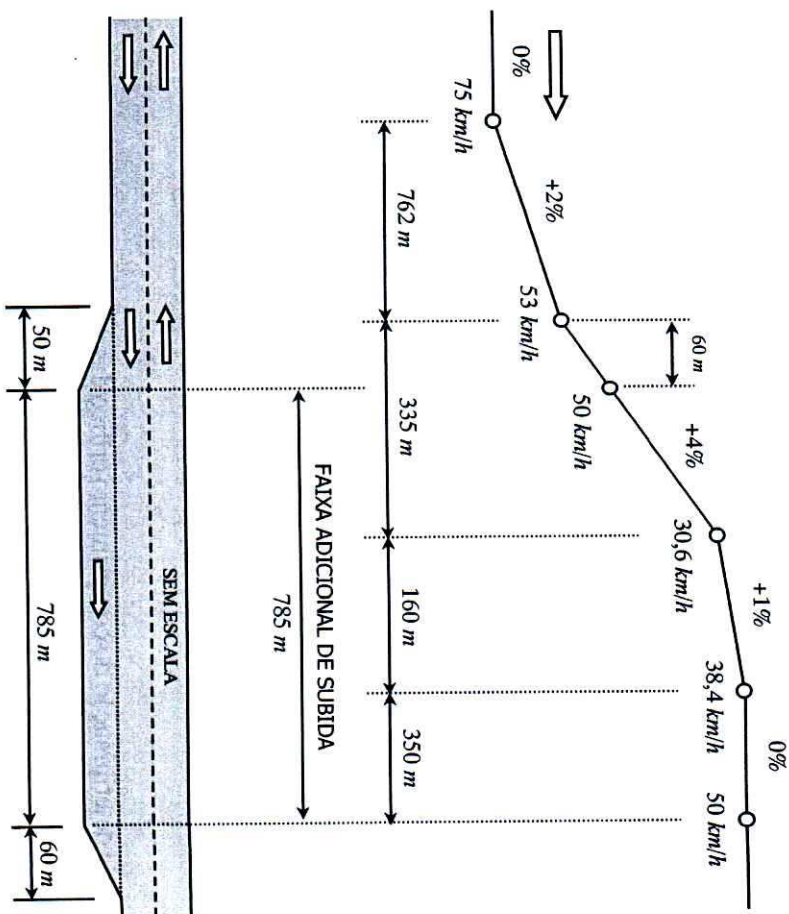


FIGURA 10.5 – Disposição típica de uma faixa adicional de subida (Fonte: CARCIENTE).

No caso em que a rampa considerada é precedida por outra rampa ascendente, pode-se calcular a perda de velocidade na rampa precedente com o uso da mesma figura 10.4, que somada à perda de velocidade na rampa seguinte fornece a perda total de velocidade.

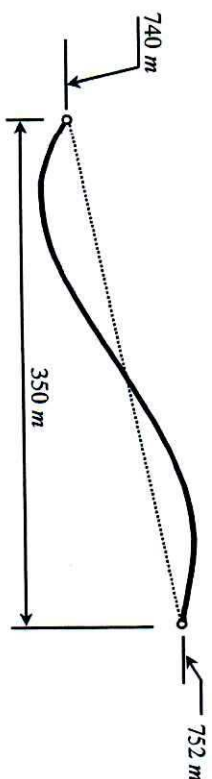
Para o estudo do comprimento crítico de rampa e comprimento de 3ª faixa, o projetista deverá dispor dos seguintes dados:

- Dimensões e potência de um veículo que seja representativo dos caminhões que percorrerão a estrada.
- Dados relativos às perdas de velocidade desse caminhão-tipo nas rampas (curvas de aceleração e desaceleração do veículo).
- Velocidade de entrada na rampa crítica, que dependerá da inclinação da rampa que precede a rampa considerada.
- Menor velocidade com a qual o caminhão-tipo possa chegar ao fim da rampa sem prejuízos acentuados do fluxo de tráfego da estrada.

Para a determinação do comprimento crítico das rampas com o uso da figura 10.4, basta seguir a seguinte seqüência:

1. Escolha do caminhão-tipo.
2. Escolha da perda de velocidade que não cause prejuízos à corrente de tráfego.
3. Entra-se no gráfico com  $i$  (inclinação da rampa) e  $\Delta V$  (perda de velocidade) e determina-se o comprimento crítico.

**EXEMPLO:** Dado o perfil da figura, determinar a inclinação do trecho e o comprimento crítico da rampa ( $C_{crit}$ ).

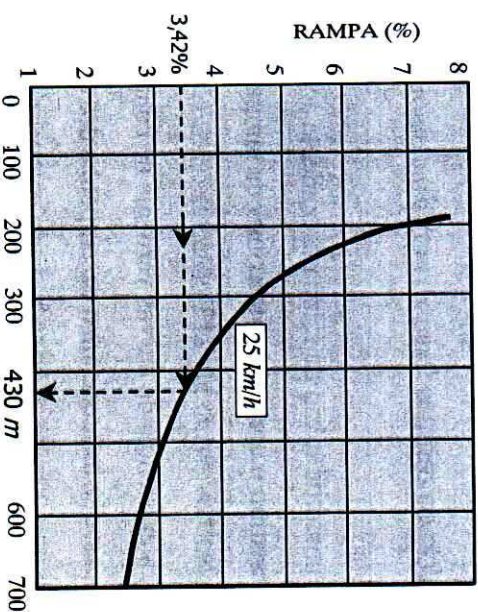


**Solução:** Declividade da rampa: 
$$i = \frac{752 - 740}{350} = 3,42\%$$

Comprimento crítico da rampa:

caminhão tipo de 20 t  
 $i = 3,42\%$   
 $\Delta V = 25 \text{ km/h}$

$C_{crit} = 430 \text{ m}$



Verificação:  $C_{crit} = 430 \text{ m} > C = 350 \text{ m}$  (OK)

**DETERMINAÇÃO DOS PONTOS DE INÍCIO E FIM DAS RAMPAS**

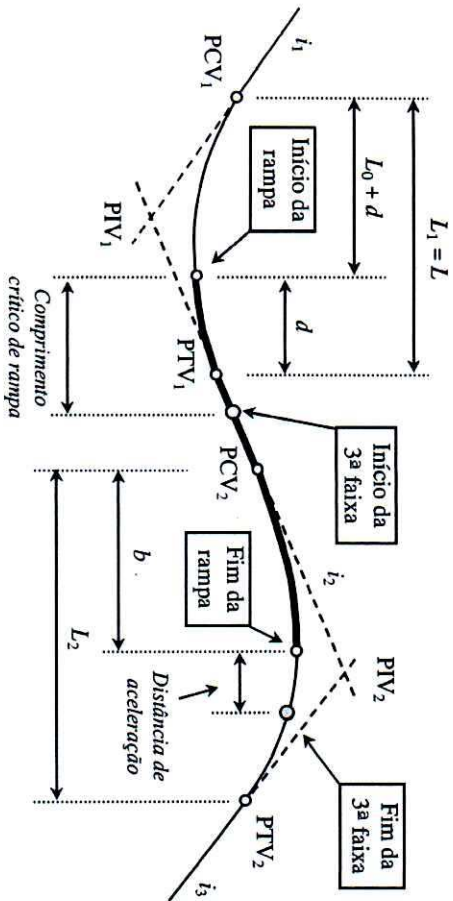


FIGURA 10.6 – Exemplo hipotético de comprimento de rampa.

**a) Ponto de início da rampa**

A distância do ponto de início da rampa ascendente ao ponto de início da terceira faixa constitui o comprimento crítico da rampa.

Tendo em vista a existência de curvas verticais de concordância no início de todas as rampas, que influenciam o desempenho dos caminhões, o ponto de início da rampa a considerar no cálculo do comprimento crítico situa-se antes do término (no sentido do tráfego ascendente) da curva vertical, de acordo com os seguintes critérios:

1. Quando a rampa ascendente é precedida de uma rampa descendente, o ponto de início da rampa ascendente é equidistante do vértice e do PTV da curva vertical côncava de concordância das duas rampas. Sua posição é dada pela expressão a seguir:

$$2d + L_0 = L$$

$$d = \frac{i_2}{2 \cdot (i_2 - i_1)} \cdot L = \frac{K \cdot i_2}{2} \tag{10.1}$$

onde:

d = distância do ponto de início da rampa ao PTV, em m.

L = comprimento da curva vertical, em m.

i<sub>1</sub> = valor algébrico da rampa descendente, em %.

i<sub>2</sub> = valor algébrico da rampa ascendente, em %.

K = parâmetro de curvatura da parábola de concordância, em m.

2. Quando a rampa ascendente em análise é precedida de uma outra rampa ascendente ou de um trecho em nível, a estaca do ponto de início da rampa coincide com a estaca do PIV da curva vertical formada pelas duas rampas.

Por razões de ordem prática, a estaca a adotar para o ponto de início da terceira faixa deverá preferencialmente coincidir com estacas inteiras ou +10, sendo sempre antecedida por um teiper adequado.



## b) Ponto final da rampa

Tendo em vista a existência de curvas verticais de concordância ao final de todas as rampas, que influem sobre o desempenho dos caminhões, as distâncias de aceleração dos veículos pesados são medidas a partir de um ponto situado antes do término da curva vertical (ponto final da rampa), de acordo com os seguintes critérios:

1. Quando a rampa ascendente é seguida de uma rampa descendente, as distâncias de aceleração são obtidas a partir do vértice da curva vertical parabólica, cuja posição é dada pela expressão abaixo:

$$b = \frac{i_2}{(i_2 - i_3)} \cdot L = K \cdot i_2$$

(10.2)

onde:

- $b$  = distância do início da curva vertical até o fim da rampa, em  $m$ .
- $L$  = comprimento da curva vertical, em  $m$ .
- $i_2$  = valor algébrico da rampa ascendente, em %.
- $i_3$  = valor algébrico da rampa seguinte, em %.
- $K$  = parâmetro de curvatura da parábola de concordância, em  $m$ .

2. Quando a rampa ascendente em análise é seguida de uma outra rampa ascendente ou de um trecho em nível, as distâncias de aceleração são medidas a partir do PIV da curva vertical em foco.

## DETERMINAÇÃO DO PONTO DE INÍCIO DA FAIXA ADICIONAL

Existem vários critérios para determinação do ponto de início de uma faixa adicional, uma vez estabelecida sua necessidade. Dentre esses critérios, os mais utilizados são os seguintes:

- Critério da redução admissível da velocidade dos caminhões carregados em relação à velocidade média destes nos trechos em nível ou com rampas suaves.
- Critério da menor velocidade admissível para os caminhões carregados em meio ao fluxo de tráfego misto.

A AASHTO propõe a adoção do primeiro critério referido acima, recomendando o valor de 25  $km/h$  como redução admissível de velocidade. Admite, entretanto, reduções de velocidade superiores ou inferiores a esse valor, conforme o greide que antecede a rampa seja descendente ou ascendente, respectivamente.

Para um caminhão num trecho em nível entrando na rampa ascendente a uma velocidade de 80  $km/h$  e, adotando uma perda de velocidade de 25  $km/h$ , a velocidade limite será de 55  $km/h$ , abaixo da qual os caminhões carregados trafegariam pela terceira faixa.

O outro critério consiste em adotar, por motivo de economia, um pequeno prolongamento da interferência dos caminhões carregados, levando-se em conta que logo a seguir uma terceira faixa será iniciada. Essas considerações conduziram à adoção da velocidade limite de 45  $km/h$ , abaixo da qual os caminhões carregados trafegariam pela terceira faixa. A distância do início da rampa até o ponto onde é atingida essa velocidade é o comprimento crítico da rampa.

A determinação do comprimento crítico de rampa é feita a partir das curvas de desaceleração de caminhões carregados, determinando no eixo das abscissas o ponto correspondente à ordenada igual à velocidade limite, e empregando a curva correspondente ao greide da rampa em análise. A figura 10.7 mostra um exemplo de curvas de desaceleração.

As curvas da figura 10.7 foram estabelecidas considerando uma velocidade de 80  $km/h$  no início de rampas ascendentes. De um modo geral, não devem ser consideradas velocidades superiores.

Quando a velocidade considerada no início da rampa ascendente for inferior a 80  $km/h$ , o comprimento crítico da rampa é obtido pela diferença entre as leituras no eixo das abscissas da figura 10.7 correspondentes às ordenadas da velocidade limite e da velocidade no início da rampa.

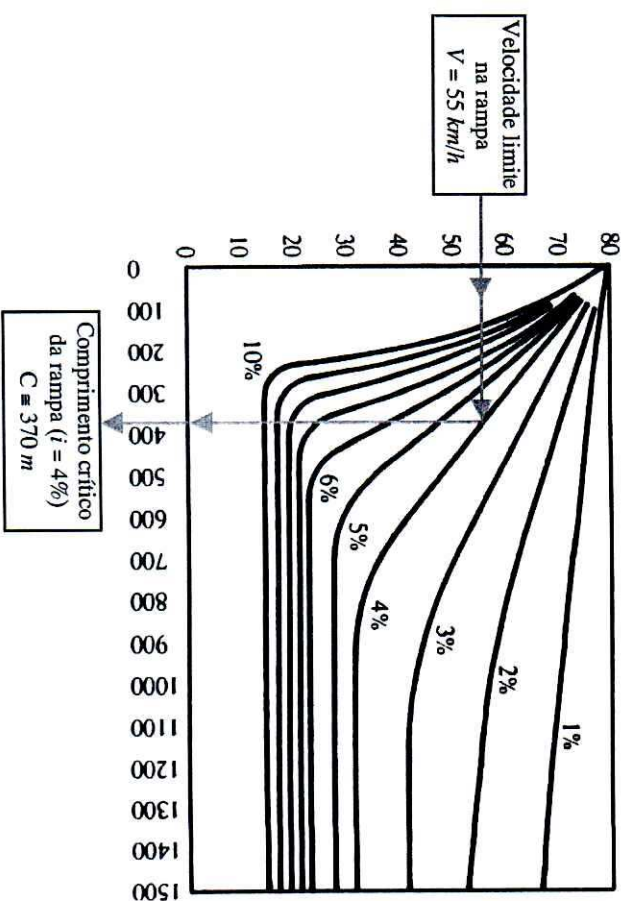


FIGURA 10.7 – Curvas de desaceleração para semi-trailer de 23 t (Fonte básica: AUSTROADS).

#### DETERMINAÇÃO DO PONTO FINAL DA FAIXA ADICIONAL

Existem dois critérios básicos a serem considerados simultaneamente para determinar o ponto final da terceira faixa:

Critério da velocidade de reentrada, que se baseia na menor velocidade admissível para reentrada dos caminhões carregados no fluxo normal, em condições aceitáveis de segurança e sem causar interferência excessiva ao restante do tráfego.

- Critério da visibilidade, que se baseia na existência de uma distância de visibilidade adequada para permitir que um caminhão carregado retornando à faixa de rolamento normal seja ultrapassado pelo restante do tráfego.

Idealmente, os caminhões carregados reentrariam na faixa de rolamento principal à velocidade normal de operação, minimizando a interferência com o restante do tráfego e as necessidades de ultrapassagem. Para tanto, seria necessário estender excessivamente as terceiras faixas, com a correspondente elevação dos custos de construção.

O DNER recomenda a velocidade de 40 *km/h* como a mínima necessária por ocasião da reentrada dos caminhões carregados na faixa de rolamento principal. Este valor visa basicamente a economia.

Alguns projetistas adotam a velocidade mínima de reentrada de 50 *km/h*, acarretando um maior comprimento para a 3ª faixa e conseqüente aumento nos custos de construção.

As distâncias a que se situam os pontos onde é atingida a velocidade de 40 *km/h* (ou outra velocidade mínima de reentrada adotada no projeto) após a rampa que requereu uma terceira faixa, denominadas distâncias de aceleração, decorrem das curvas de aceleração de caminhões carregados.

Estas distâncias de aceleração são obtidas pela diferença entre as leituras no eixo das abscissas correspondentes às ordenadas da velocidade mínima de reentrada adotada e da velocidade de sustentação na rampa precedente com terceira faixa. A figura 10.8 mostra um exemplo de curvas de aceleração de veículos pesados.

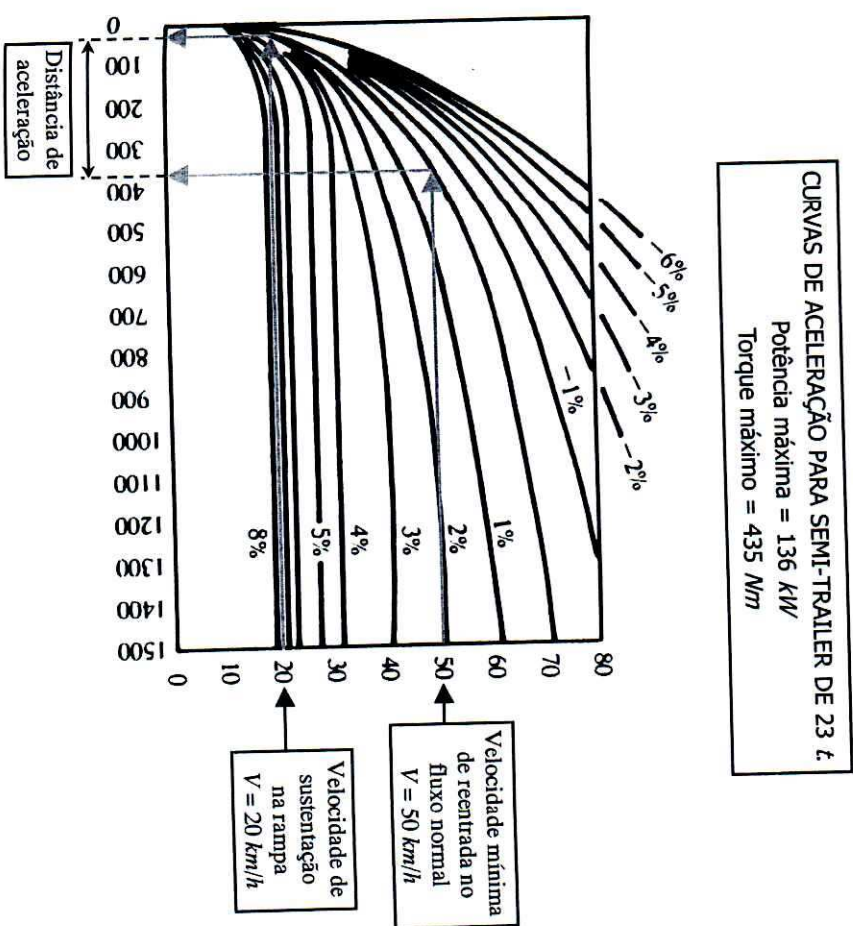
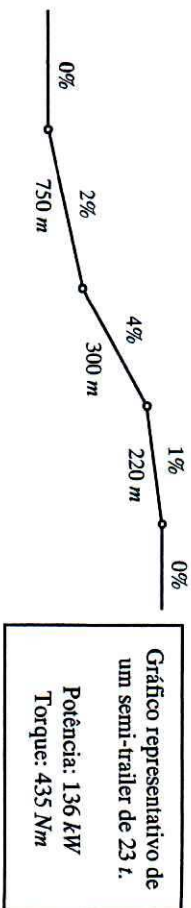


FIGURA 10.8 – Determinação da distância de aceleração.

(Fonte básica: AUSTRROADS).



A linha pontilhada nos gráficos representa o método para determinar a velocidade nas respectivas rampas.

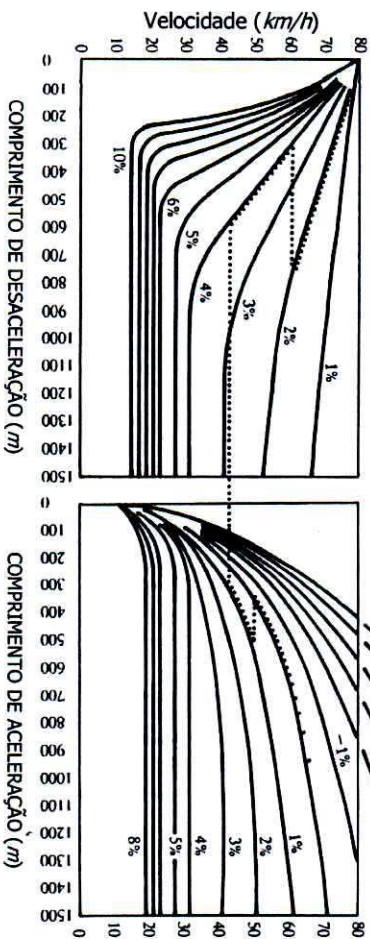


FIGURA 10.9 – Determinação da velocidade de caminhões nas rampas (Fonte: AUSTRROADS).

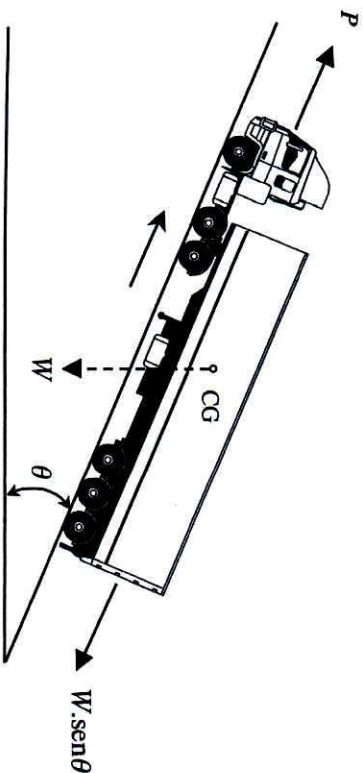


FIGURA 10.10 – Forças atuando num veículo pesado em rampa.

Aplicando a 2ª Lei de Newton ao sistema de forças da figura 10.10, temos:

$$F_R = m \cdot \gamma$$

$$P - W \cdot \text{sen } \theta = \frac{W}{g} \cdot \frac{dV}{dt}$$

$$\frac{P}{W} = \frac{1}{g} \cdot \frac{dV}{dt} + \text{sen } \theta$$

Fazendo  $P/W = aV + b$ , onde  $a$  e  $b$  são constantes no intervalo de variação  $V_n < V < V_{n+1}$ , temos:

$$\frac{dV}{dt} - g \cdot a \cdot V - g \cdot (b - \text{sen } \theta) = 0$$

(10.3)

Substituindo  $dV/dt$  por  $(V - V_0)/t$  e  $V$  pela velocidade média  $\bar{V}$ , temos:

$$\frac{V - V_0}{t} - g \cdot a \cdot \bar{V} - g \cdot (b - \text{sen } \theta) = 0$$

onde:

$$\bar{V} \cdot t = \frac{(V - V_0) - g \cdot t \cdot (b - \text{sen } \theta)}{g \cdot a}$$

Uma distância  $D$  qualquer pode ser determinada pela expressão  $\bar{V} \cdot t$ .  
Substituindo este valor na equação anterior, temos:

$$D = \frac{1}{a} \cdot \left[ \frac{V - V_0}{g} - t \cdot (b - \text{sen } \theta) \right] \quad (10.4)$$

Isolando  $dt$  na equação 10.3 e integrando, temos:

$$dt = \frac{dV}{g(a \cdot V - \text{sen } \theta + b)} \quad \therefore \int_{t_0}^t dt = \frac{1}{g} \cdot \int_{V_0}^V \frac{dV}{aV - \text{sen } \theta + b}$$

$$t = \frac{1}{a \cdot g} \cdot \ln \left( \frac{aV + b - \text{sen } \theta}{aV_0 + b - \text{sen } \theta} \right) \quad (10.5)$$

onde:

$D$  = distância percorrida na direção do movimento, em  $m$ .

$V$  = velocidade, em  $m/s$ .

$V_0$  = velocidade quando  $t = 0$ .

$\theta$  = ângulo da rampa.

$t$  = tempo de percurso.

$g$  = aceleração da gravidade ( $9,8 \text{ m/s}^2$ ).

As curvas de aceleração e desaceleração de veículos pesados são representações das equações 10.4 e 10.5.

TABELA 10.2 – Determinação do início das faixas adicionais e respectivos comprimentos mínimos.

| GREIDE (%) | $a$ (m)<br>Distância entre o início da rampa e o início da 3ª faixa | $b$ (m)<br>Comprimento mínimo a ser considerado para a 3ª faixa |
|------------|---|---|
| 3,0        | 830   | 670   |
| 3,5        | 650   | 550   |
| 4,0        | 530   | 450   |
| 4,5        | 440   | 360   |
| 5,0        | 380   | 300   |
| 5,5        | 330   | 260   |
| 6,0        | 290   | 230   |
| 6,5        | 260   | 200   |

Obs.:  $a$  = comprimento crítico da rampa para uma velocidade de entrada de  $80 \text{ km/h}$ .

TABELA 10.3 – Determinação do final da 3ª faixa para diferentes greides.

| GREIDE (%) | VELOCIDADE DE SUSTENTAÇÃO DOS CAMINHÕES (km/h) | DISTÂNCIA EM METROS A PARTIR DO TOPO DA CURVA VERTICAL ATÉ O FINAL DA 3ª FAIXA (EXCLUINDO TEIPER), QUANDO A RAMPA SEGUIRTE FOR: |     |     |     |     |     |     |     |     |  |  |
|------------|--|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--|--|
|            |  | -6%   | -5% | -4% | -3% | -2% | -1% | 0%  | +1% | +2% |  |  |
| 3,0        | 33   | 50  | 50  | 50  | 55  | 60  | 75  | 100 | 190 | 420 |  |  |
| 3,5        | 29   | 50  | 50  | 55  | 65  | 80  | 100 | 145 | 260 | 530 |  |  |
| 4,0        | 26   | 50  | 55  | 65  | 75  | 95  | 125 | 180 | 300 | 610 |  |  |
| 4,5        | 23   | 55  | 60  | 70  | 85  | 105 | 140 | 205 | 330 | 660 |  |  |
| 5,0        | 21   | 55  | 65  | 75  | 90  | 115 | 155 | 220 | 350 | 710 |  |  |
| 5,5        | 19   | 60  | 65  | 80  | 95  | 120 | 165 | 245 | 360 | 730 |  |  |
| 6,0        | 18   | 60  | 70  | 85  | 100 | 130 | 170 | 250 | 365 | 740 |  |  |
| 6,5        | 17   | 60  | 70  | 90  | 110 | 140 | 175 | 250 | 370 | 750 |  |  |

Fonte: DNBR

### Considerações sobre a tabela 10.3:

1. As distâncias constantes nesta tabela foram calculadas de modo a permitir que os caminhões acelerando atinjam a velocidade de 40 km/h.
2. Esta tabela deve ser usada somente nos casos em que a distância de visibilidade for suficiente para permitir a ultrapassagem com segurança.
3. O teiper recomendado para o final da terceira faixa é de 60 m.
4. Os valores da tabela derivam das curvas de desempenho do caminhão representativo (veículo de projeto).

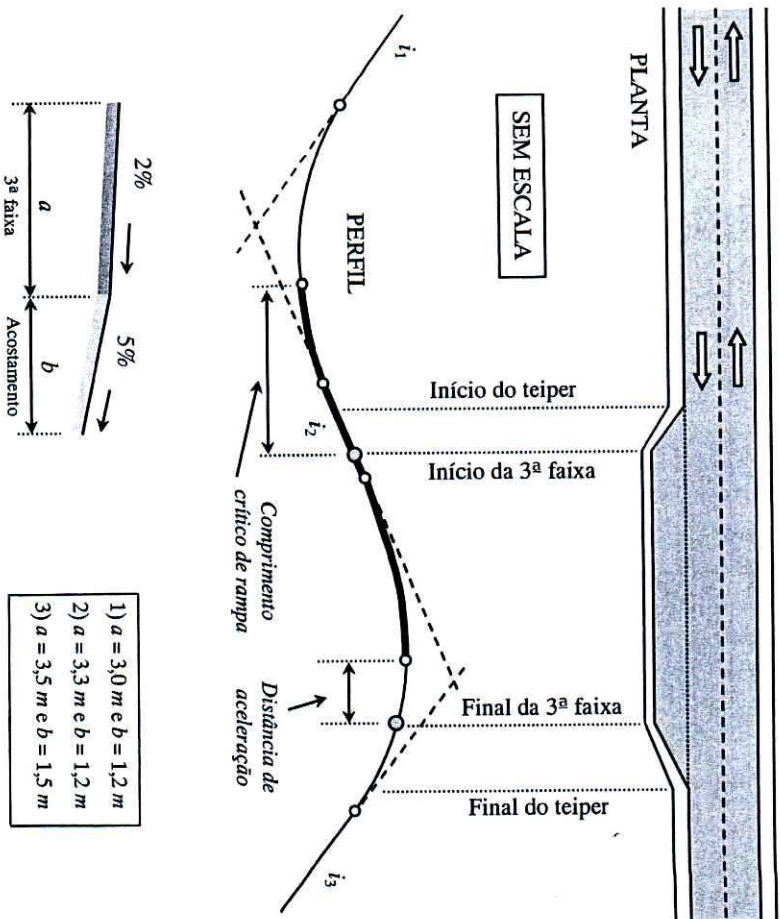


FIGURA 10.11 – Localização e geometria de faixas auxiliares de subida.

## COORDENAÇÃO DOS ALINHAMENTOS HORIZONTAL E VERTICAL

Os alinhamentos horizontal e vertical devem ser adequadamente combinados. Uma má combinação desses alinhamentos poderá agravar as deficiências de cada um deles. Um bom projeto é aquele que mediante uma harmoniosa combinação dos traçados em planta e perfil se consegue um aumento da segurança e eficiência da estrada, melhorando também a aparência.

Representar longas extensões do perfil em escala menor que a habitual esquematizando no rodapé o traçado em planta (tangentes e sentido das curvas) facilita o estudo gráfico da conjugação desses elementos fundamentais do traçado.

O diagrama de barras é a representação do projeto geométrico horizontal, de forma esquemática, no rodapé do perfil longitudinal do terreno. Esse diagrama e o perfil longitudinal permitem a visualização conjunta do eixo da estrada em planta e perfil, possibilitando sempre que possível, a coordenação entre os projetos geométricos horizontal e vertical.

A figura 10.12 mostra a representação esquemática de um diagrama de barras. Esta representação corresponde a três trechos retos concordados por uma curva de transição à direita e uma curva circular simples à esquerda.

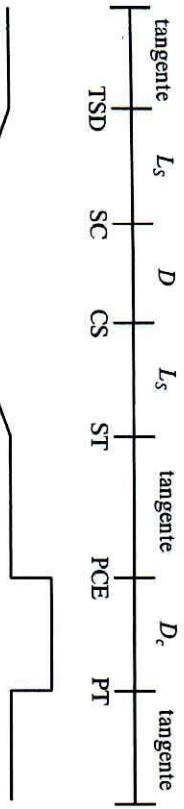


FIGURA 10.12 – Diagrama de barras.

A coordenação dos alinhamentos horizontal e vertical confere à rodovia boas características de segurança, conforto de dirigir e aparência.

De acordo com o DNER, alguns aspectos básicos a considerar objetivando estabelecer essa conjugação encontram-se resumidos a seguir e ilustrados nas figuras 10.13 a 10.18.

- Trechos em tangente horizontal não são coerentes com freqüentes quebras no greide e vice-versa.
- Curvas verticais e horizontais devem se superpor, de preferência as horizontais iniciando um pouco antes das verticais. Os vértices das tangentes das curvas verticais e horizontais devem aproximadamente coincidir.
- Curvas horizontais não devem iniciar ou findar no cume das lombadas para não surpreender o motorista. Quando a curva horizontal se encontra dentro de um corte, esse efeito será reduzido pelo balizamento natural dos taludes de corte.

- Analogamente, curvas horizontais não devem ter seu início coincidente com pontos baixos do greide, ao final de longas descidas, por causa do natural aumento de velocidade nestas descidas.
- Em rodovias de pista dupla, é desejável que os traçados em planta e perfil sejam independentes para as duas pistas.

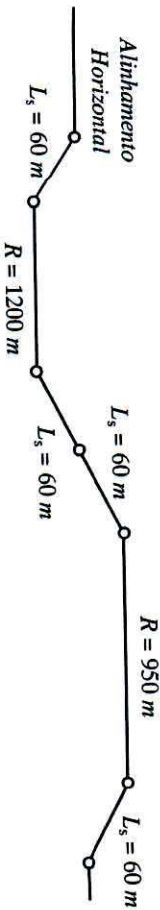
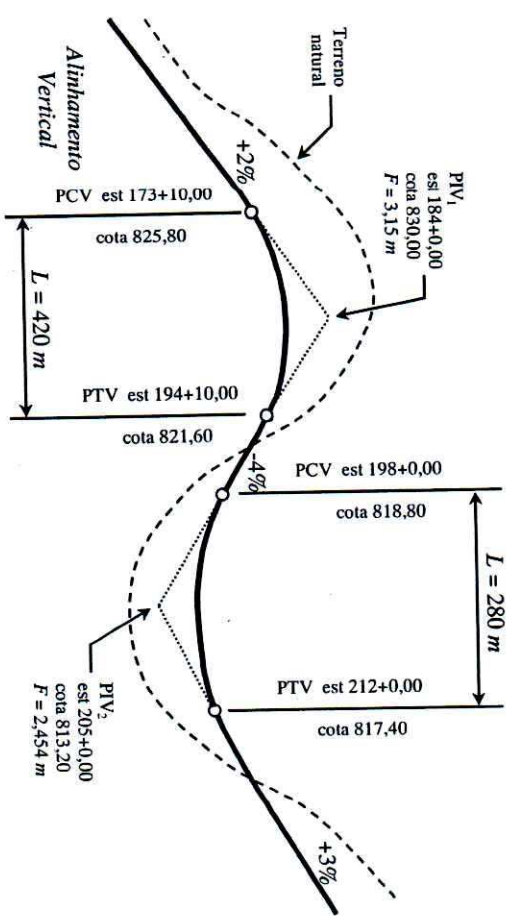
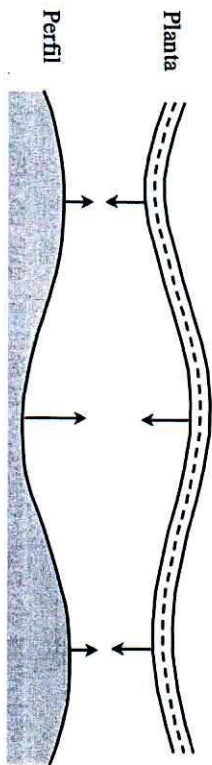
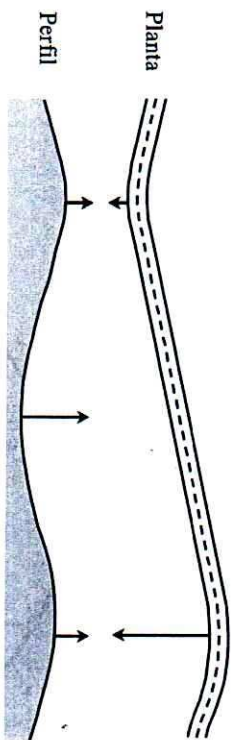


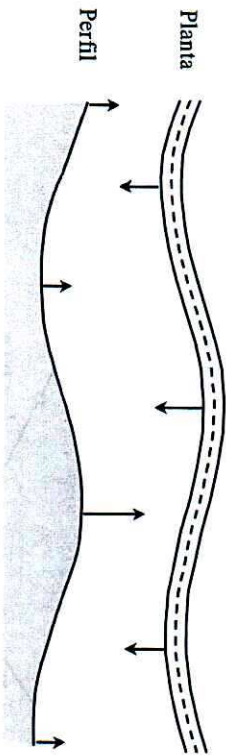
FIGURA 10.13 – Perfil longitudinal e diagrama de barras (Fonte: PIMENTA).



Os vértices das curvas horizontais e verticais coincidem aproximadamente. As horizontais são um pouco mais longas e anunciam as verticais.

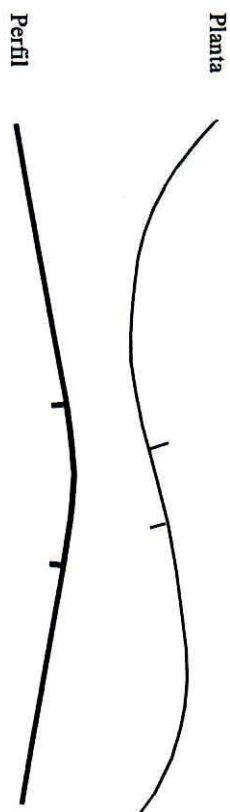


Uma das deflexões do alinhamento horizontal foi suprimida, mas os demais vértices ainda coincidem.

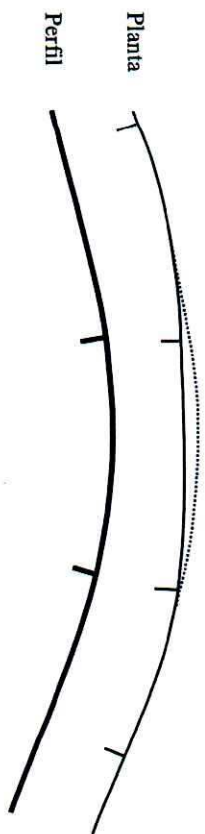


Falta de coordenação. Os vértices de um alinhamento coincidem com os pontos de inflexão do outro.

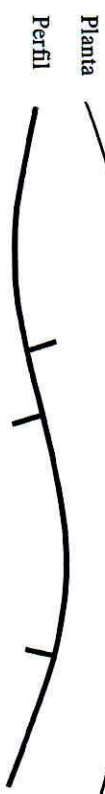
FIGURA 10.14 – Combinação de alinhamentos (Fonte: DNER).



Combinação anti-estética e perigosa. A reversão de traçado ocorre no vértice da curva vertical.



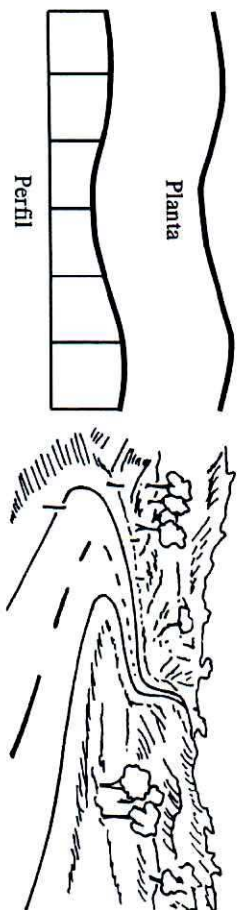
Dois curvas sucessivas no mesmo sentido devem ser ligadas por ampla curva composta. O perfil convexo atenua a deformação que ocorre quando as curvas são ligadas por uma tangente curta.



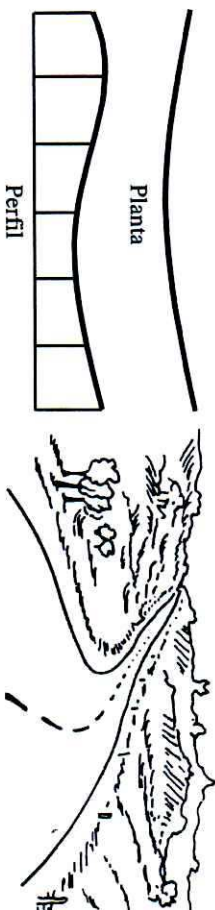
Curvas horizontais longas podem associar-se a suaves ondulações em perfil.

FIGURA 10.15 – Combinação de alinhamentos (Fonte: DNER).

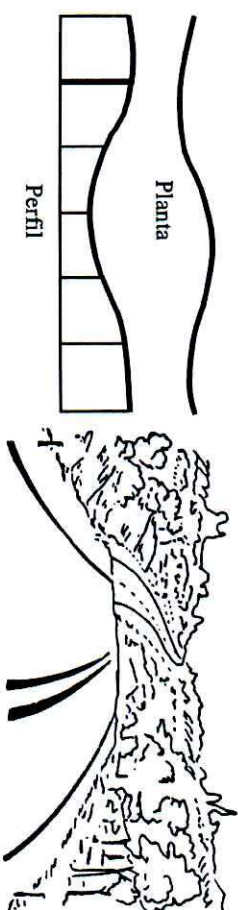




Combinação ideal. Um traçado fluente resulta quando as curvas horizontais e verticais coincidem. Idealmente, as horizontais devem sobrepor ligeiramente as verticais.



Se a escala horizontal é grande e a vertical é relativamente pequena, pode ser satisfatório incluir duas curvas verticais ao longo da curva horizontal extensa.



O topo da curva vertical restringe a visibilidade no início da curva horizontal e pode gerar uma situação perigosa.

FIGURA 10.16 – Combinação de alinhamentos (Fonte: AUSTRROADS).

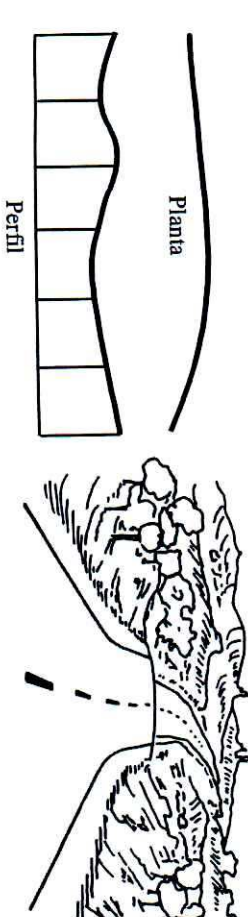
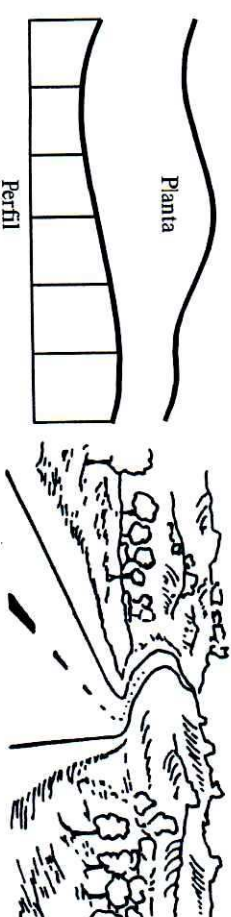
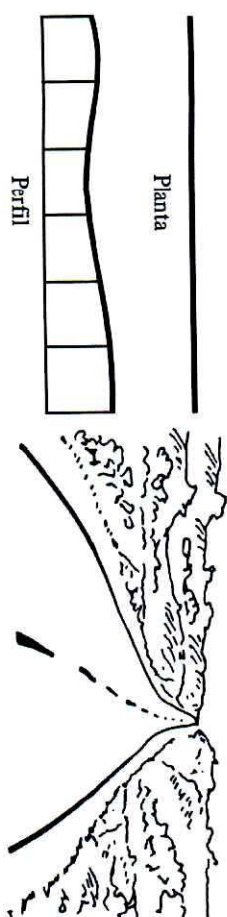


FIGURA 10.17 – Combinação de alinhamentos (Fonte: AUSTRROADS).

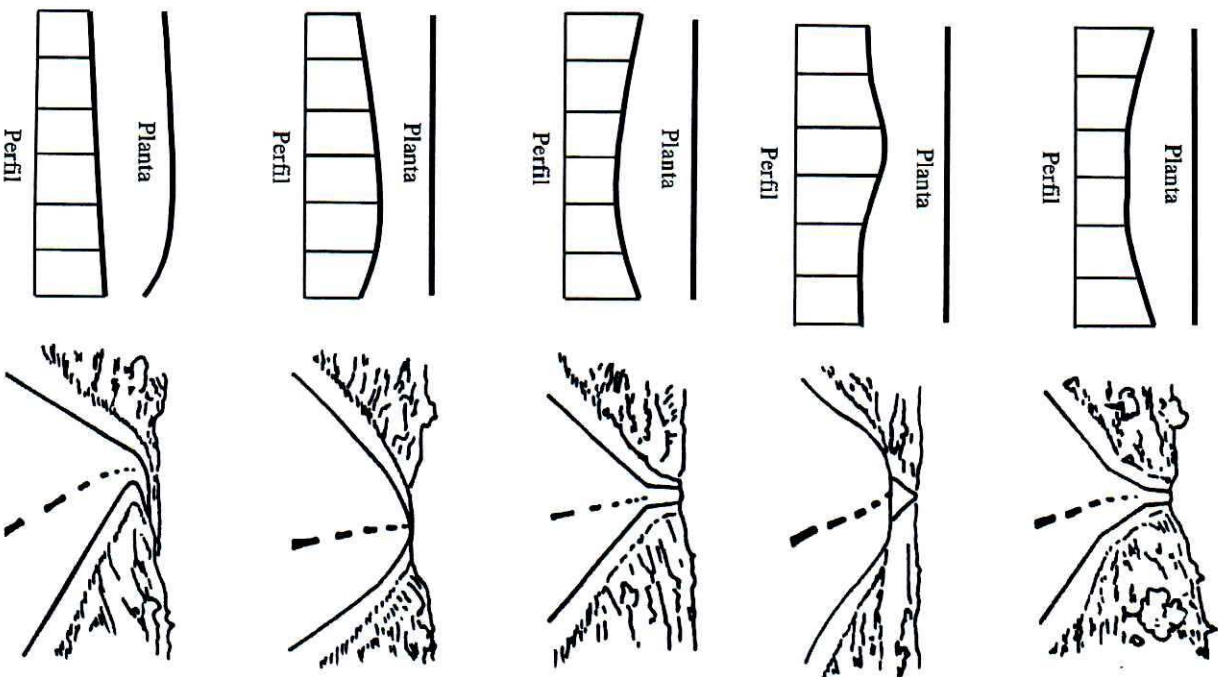


FIGURA 10.18 – Combinação de alinhamentos (Fonte: AUSTROADS).

## CAPÍTULO 11

# INTERSEÇÕES RODOVIÁRIAS

*"Zaranda coraiça direita, campo limpa,  
Se sobra algum, compra comida e roupa"*

**ERASMO**

Humanista Holandês

## INTRODUÇÃO

Denomina-se interseção a área em que duas ou mais vias se cruzam ou se unificam, e na qual estão localizados todos os dispositivos destinados a ordenar os diversos movimentos do tráfego.

O projeto dos elementos geométricos que constituem uma interseção baseia-se, em geral, nos mesmos princípios que orientam o projeto geométrico dos outros componentes da estrada. A qualidade do projeto de uma rodovia, no que se refere à eficiência, segurança, custos de operação, capacidade e velocidade, é afetada significativamente pela qualidade do projeto de suas interseções.

A escolha de um tipo de interseção é baseada principalmente nos seguintes dados:

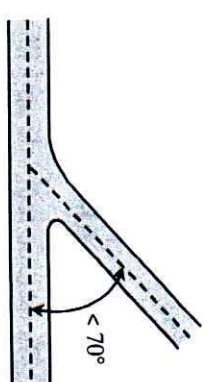
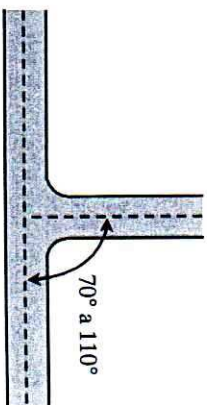
- **Funcionais:** classificação funcional das vias, tipo de vias, tipo de controle de acesso, prioridades de passagem e velocidades.
- **Físicos:** topografia, edificações e serviços públicos.
- **Tráfego:** volume e composição do tráfego, diagrama de fluxos de tráfego e volume de pedestres.
- **Acidentes:** tipos de acidentes, causas e distribuição no tempo.
- **Financeiros:** meios disponíveis para o investimento, bem como custos de exploração, manutenção e construção.

De uma maneira geral, as interseções podem ser classificadas em duas categorias: a) Interseções em nível; b) Interseções em desnível, ou interconexões.

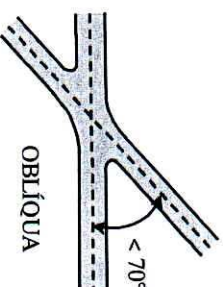
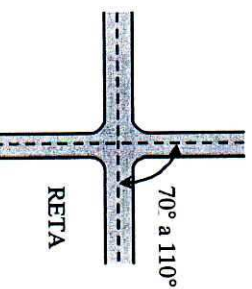
## INTERSEÇÕES EM NÍVEL

As interseções em nível são aquelas em que ocorre, numa certa extensão, a coincidência dos greides das vias. Dentro da variedade de formas e características das interseções, existe uma série de tipos entre os quais se ajustam a maior parte dos casos reais. Os principais tipos de interseções são os seguintes:

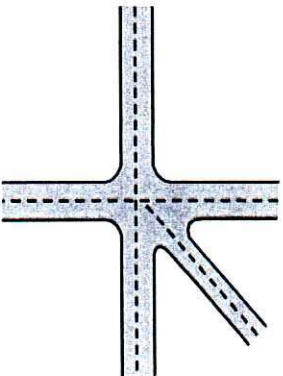
- **INTERSEÇÕES COM 3 RAMOS:** são chamadas de interseções em T ou em Y. Quando dois ramos formam uma via contínua e são interceptadas por um terceiro ramo num ângulo entre  $70^\circ$  e  $110^\circ$ , tem-se uma interseção em T. Caso contrário, a interseção é em Y.



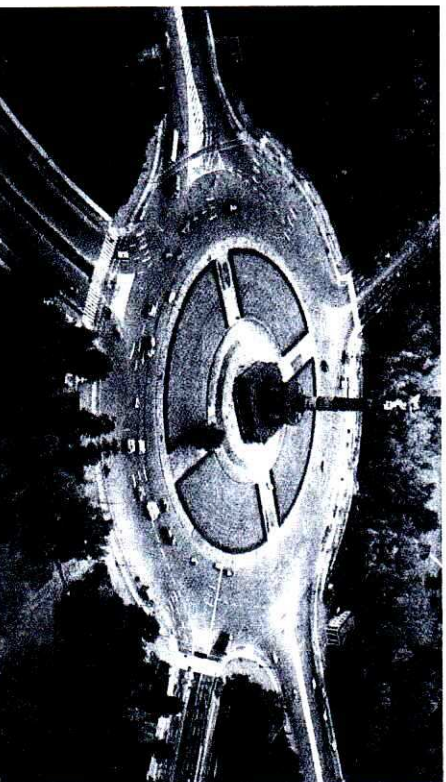
- **INTERSEÇÕES COM 4 RAMOS:** podem ser retas, oblíquas ou assimétricas. Se o ângulo estiver entre  $70^\circ$  e  $110^\circ$ , tem-se uma interseção reta, caso contrário, oblíqua. Uma interseção com dois ramos separados na área da interseção, é chamada interseção assimétrica (ou defasada).



- **INTERSEÇÕES DE RAMOS MÚLTIPLOS:** são interseções com cinco ou mais ramos.



- **ROTATÓRIAS:** interseções na qual o tráfego se move no sentido anti-horário ao redor de uma ilha central. Em certas circunstâncias a rotatória pode ser a solução mais adequada, como por exemplo: interseção com cinco ou mais aproximações e com intensidades de tráfego aproximadamente iguais em todas elas, áreas extensas e planas, pouco movimento de pedestres e distâncias suficientemente grandes entre as aproximações (para permitir o entrelaçamento).



As interseções citadas podem apresentar ainda mais três subdivisões: com canalização, sem canalização e com alargamento. O tipo canalizado é aquele que possui sinalização horizontal ou pequenas ilhas de canalização de tráfego distribuídas na interseção.

Dependendo das intensidades dos fluxos de tráfego que se interceptam, pode ser necessária a adoção de sinalização horizontal, vertical ou semafórica para controle do tráfego, visando dotar a interseção de condições adequadas de tráfego e segurança.

### **TIPOS DE MANOBRAS E CONFLITOS**

Os tipos de manobras dos veículos numa interseção em nível estão relacionados a seguir e resumidos na figura 11.1.

- Divergente.
- Convergente.
- Cruzamento.
- Entrelaçamento.

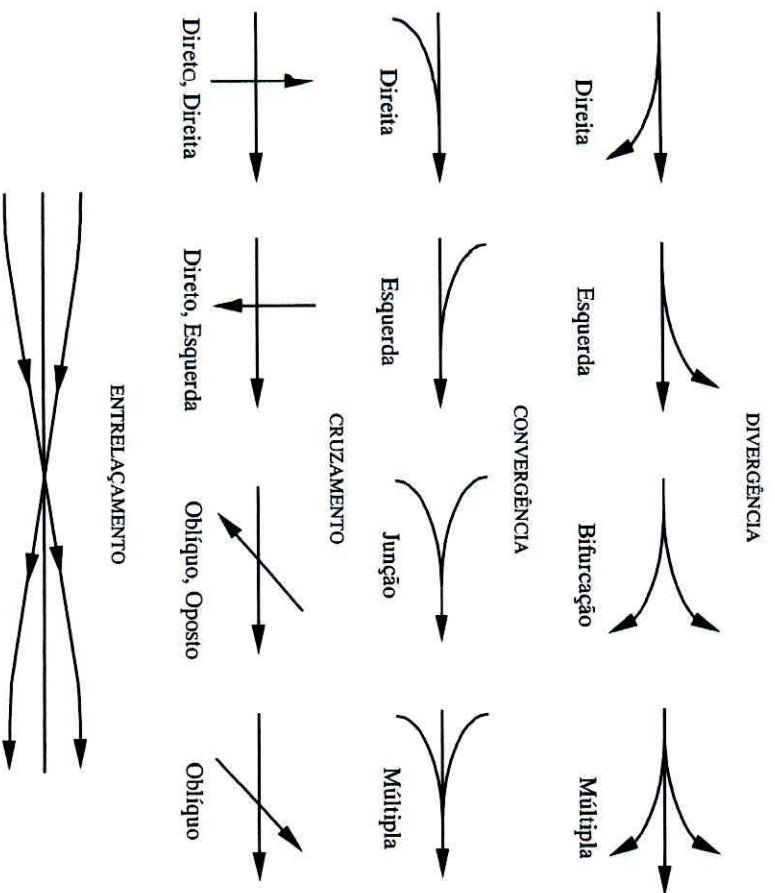


FIGURA 11.1 – Tipos de manobras.

Pontos de conflito de uma estrada são os locais onde as correntes de tráfego principais sofrem interferência de outras correntes. Particularmente, nos pontos de interferência, o comportamento dessas correntes de tráfego não somente dependerá da sua composição, volume e velocidade, como também do tipo e forma da interferência. Os principais tipos de conflito estão relacionados a seguir e ilustrados na figura 11.2.

- Conflito de convergência.
- Conflito de divergência.
- Cruzamento com tráfego direto.
- Cruzamento com tráfego de conversão.

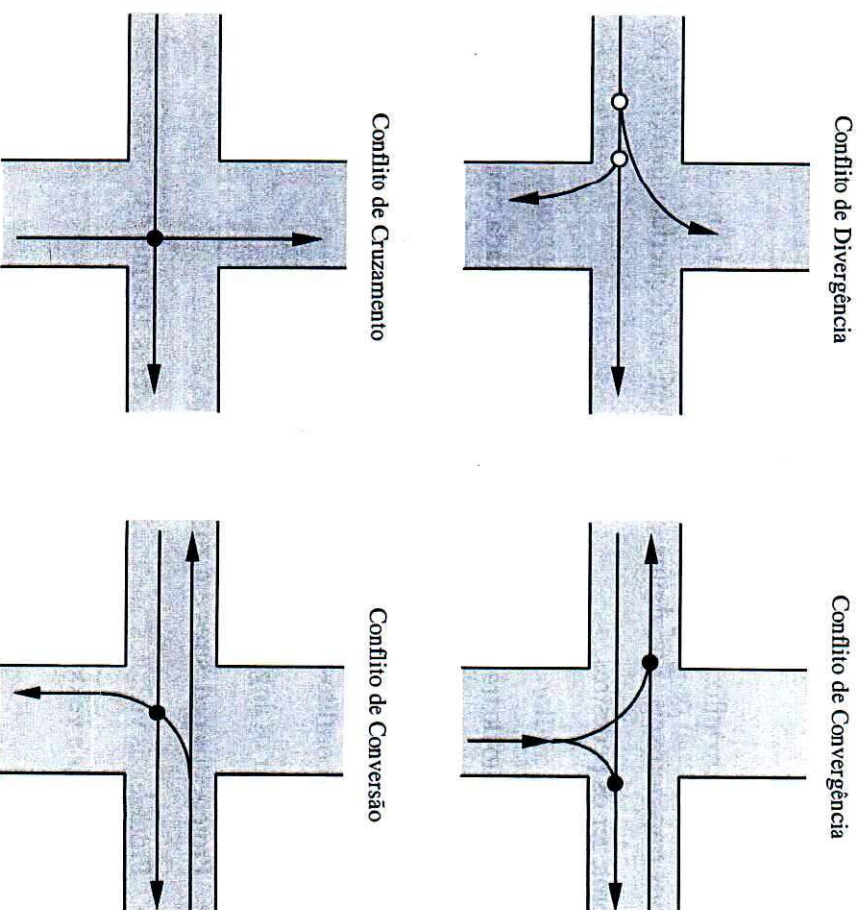


FIGURA 11.2 – Tipos de conflitos.

## PRINCÍPIOS DE CANALIZAÇÃO DE TRÁFEGO

A canalização numa interseção em nível representa a separação ou regulamentação dos movimentos de tráfego conflitantes em trajetórias bem definidas, através do uso de marcas no pavimento (sinalização horizontal), ilhas de canalização ou outros meios visando incrementar a segurança e ordenar os movimentos tanto de veículos como de pedestres.

Quando forem utilizadas ilhas físicas, estas devem ser delineadas por meios-fios transponíveis. Em alguns casos podem ser requeridas barreiras para proteger os pedestres.

A canalização do tráfego, basicamente, pode ser utilizada com as seguintes finalidades:

- Separar conflitos entre veículos.
- Controlar os ângulos das trajetórias dos veículos.
- Proteger os pedestres em zonas urbanas.
- Proteger os veículos que efetuam manobras à esquerda.
- Controlar a velocidade dos veículos.

Os princípios ou regras gerais a serem adotados na canalização de uma interseção são os seguintes:

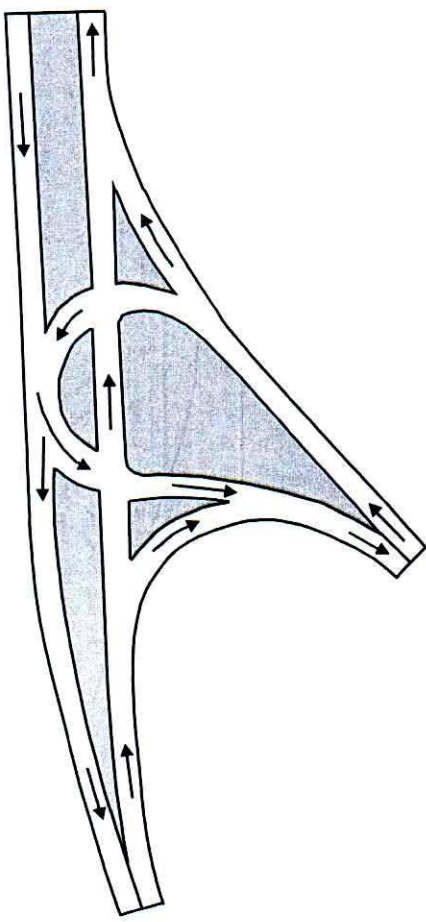
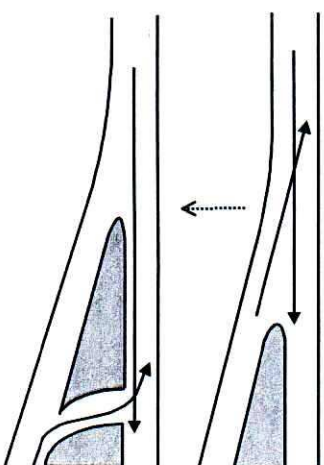
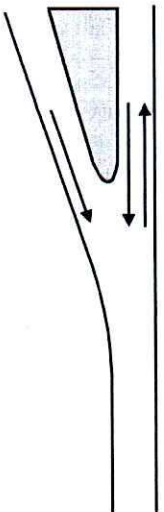


FIGURA 11.3 – Interseção canalizada de alto padrão (tipo bulbo).

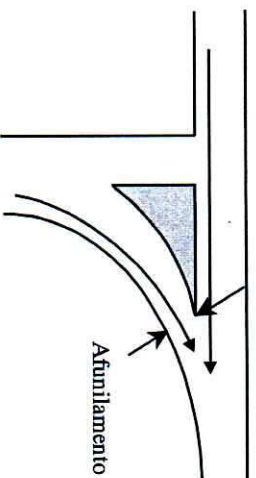
1. Deve-se, sempre que possível, reduzir as áreas de conflito.
2. Quando as correntes de tráfego se cruzam sem convergência ou entrelaçamento, o cruzamento deverá ser feito em ângulo reto ou próximo a este.



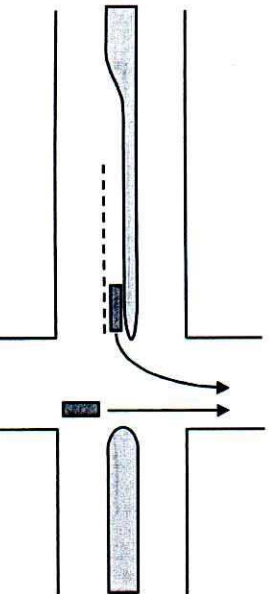
3. A convergência de correntes de tráfego deve ser realizada através de ângulos pequenos, de maneira a minimizar a velocidade relativa dos veículos.



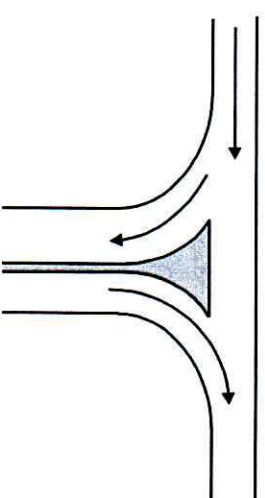
4. Pode-se controlar a velocidade da corrente de tráfego que se aproxima da interseção através do afunilamento gradativo da faixa de rolamento.



5. Proporcionar refúgio aos veículos que vão cruzar ou convergir.



6. Separar os pontos de conflito existentes dentro da interseção.
7. A canalização deve evitar ou pelo menos desencorajar os movimentos não permitidos.



8. A canalização de uma interseção deve criar espaços apropriados para a instalação de dispositivos de sinalização e controle de tráfego.

### **FAIXAS DE MUDANÇA DE VELOCIDADE**

São faixas construídas com o objetivo de proporcionar aos veículos espaço adequado que lhes permita manobras de variação de velocidade (aceleração ou desaceleração), sem provocar interferências com o tráfego principal. Essas faixas facilitam as mudanças de velocidade entre as vias principais e os ramos de entrada e saída. No que se refere às faixas de aceleração e desaceleração, os tipos mais utilizados são os representados nas figuras 11.4.

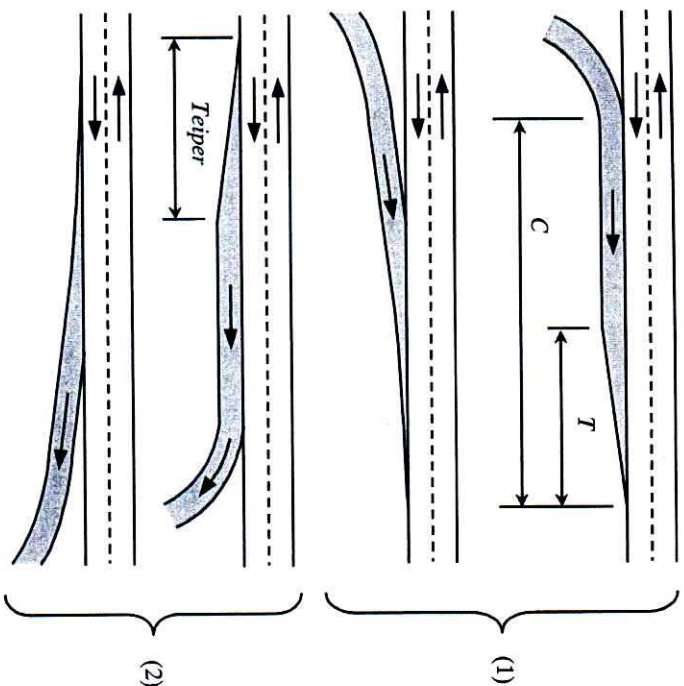


FIGURA 11.4 – Faixas de aceleração (1) e desaceleração (2).

No início e no fim das faixas de mudança de velocidade, geralmente há necessidade de introduzir um trecho de largura variável, denominado teiper. Considerando-se que o deslocamento lateral de um veículo se processa à velocidade de 1,0 m/s e que a largura da faixa de mudança de velocidade é geralmente de 3,0 a 3,5 metros, o veículo leva de 3,0 a 3,5 segundos para percorrer o teiper. As tabelas 11.1 e 11.2 a seguir resumem os valores recomendados para comprimento das faixas de mudança de velocidade e dos teipers.

TABELA 11.1 – Comprimento de projeto das faixas de mudança de velocidade para greides suaves ( $\leq 2\%$ ).

| Velocidade de projeto da curva de conversão (km/h) | Comprimento de projeto da curva de conversão (m) |     | Comprimento total da faixa de DESACELERAÇÃO, incluindo o teiper (m) |     |     |     |     |     |     |    |     |     |     |  |
|--|--|-----|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|--|
|  | 0  | 10  | 20  | 30  | 40  | 50  | 60  | 70  | 80  | 90 | 100 | 110 | 120 |  |
| 40   | 40   | 60  | 40  |     |     |     |     |     |     |    |     |     |     |  |
| 50   | 45   | 80  | 50  | 45  |     |     |     |     |     |    |     |     |     |  |
| 60   | 55   | 90  | 70  | 65  | 55  |     |     |     |     |    |     |     |     |  |
| 70   | 60   | 110 | 90  | 85  | 75  | 60  |     |     |     |    |     |     |     |  |
| 80   | 70   | 120 | 100   | 95  | 80  | 70  |     |     |     |    |     |     |     |  |
| 90   | 75   | 130 | 120   | 110 | 100 | 85  | 75  |     |     |    |     |     |     |  |
| 100  | 85   | 140 | 130   | 125 | 115 | 100 | 85  |     |     |    |     |     |     |  |
| 110  | 90   | 150 | 140   | 135 | 125 | 110 | 100 | 90  |     |    |     |     |     |  |
| 120  | 100  | 160 | 150   | 140 | 130 | 115 | 110 | 105 | 100 |    |     |     |     |  |

| Velocidade de projeto da rodovia (km/h) | Comprimento do teiper (m) | Comprimento total da faixa de ACELERAÇÃO, incluindo o teiper (m) |     |     |     |     |     |     |     |  |  |  |  |
|---|---------------------------|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--|--|--|--|
|   |                           | Caso 1 – Rodovias de trânsito intenso                            |     |     |     |     |     |     |     |  |  |  |  |
| 40                                      | 40                        | 60   | 40  |     |     |     |     |     |     |  |  |  |  |
| 50                                      | 45                        | 90   | 70  | 60  | 45  |     |     |     |     |  |  |  |  |
| 60                                      | 55                        | 130  | 110 | 100 | 70  | 55  |     |     |     |  |  |  |  |
| 70                                      | 60                        | 180  | 150 | 140 | 120 | 90  | 60  |     |     |  |  |  |  |
| 80                                      | 70                        | 230  | 210 | 200 | 180 | 140 | 100 | 70  |     |  |  |  |  |
| 90                                      | 75                        | 280  | 250 | 240 | 220 | 190 | 140 | 100 | 75  |  |  |  |  |
| 100                                     | 85                        | 340  | 310 | 290 | 280 | 240 | 200 | 170 | 110 |  |  |  |  |
| 110                                     | 90                        | 390  | 360 | 350 | 320 | 290 | 250 | 200 | 160 |  |  |  |  |
| 120                                     | 100                       | 430  | 400 | 390 | 360 | 330 | 290 | 240 | 200 |  |  |  |  |

| Velocidade de projeto da rodovia (km/h) | Comprimento do teiper (m) | Caso 2 – Rodovias de trânsito pouco intenso |     |     |     |     |     |     |     |    |    |    |
|---|---------------------------|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|----|----|
|   |                           | 40  | 45  | 50  | 55  | 60  | 60  | 60  | 70  | 75 | 85 | 90 |
| 40                                      | 40                        | 40  |     |     |     |     |     |     |     |    |    |    |
| 50                                      | 45                        | 50  | 45  |     |     |     |     |     |     |    |    |    |
| 60                                      | 55                        | 80  | 60  | 55  |     |     |     |     |     |    |    |    |
| 70                                      | 60                        | 120   | 100 | 90  | 60  |     |     |     |     |    |    |    |
| 80                                      | 70                        | 160   | 140 | 130 | 110 | 70  |     |     |     |    |    |    |
| 90                                      | 75                        | 200   | 180 | 170 | 140 | 100 | 75  |     |     |    |    |    |
| 100                                     | 85                        | 250   | 220 | 210 | 190 | 180 | 120 | 85  |     |    |    |    |
| 110                                     | 90                        | 300   | 260 | 250 | 230 | 200 | 150 | 100 | 90  |    |    |    |
| 120                                     | 100                       | 330   | 300 | 290 | 260 | 240 | 190 | 140 | 100 |    |    |    |



TABELA 11.2 – Variação do comprimento das faixas de mudança de velocidade em função do greide.

| FAIXAS DE DESACELERAÇÃO               |   |                                   |
|---------------------------------------|---|-----------------------------------|
| Velocidade de projeto ( <i>km/h</i> ) | FATOR DE MULTIPLICAÇÃO A SER ADOTADO PARA OS COMPRIMENTOS CONSTANTES DA TABELA 11.1 |                                   |
| TODAS                                 | Rampa ascendente de 3 a 4%: 0,9   | Rampa descendente de 3 a 4%: 1,2  |
| TODAS                                 | Rampa ascendente de 5 a 6%: 0,8   | Rampa descendente de 5 a 6%: 1,35 |

| FAIXAS DE ACELERAÇÃO                             |   |     |     |     |     |     |     |                      |      |                             |
|--|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----------------------|------|-----------------------------|
| Velocidade de projeto da rodovia ( <i>km/h</i> ) | FATOR DE MULTIPLICAÇÃO A SER ADOTADO PARA OS COMPRIMENTOS CONSTANTES DA TABELA 11.1 |     |     |     |     |     |     |                      |      |                             |
|  | VELOCIDADE DE PROJETO DAS CURVAS DE CONVERSÃO                                       |     |     |     |     |     |     |                      |      |                             |
|  | 20  | 30  | 40  | 50  | 60  | 70  | 80  | TODAS AS VELOCIDADES |      |                             |
|  | Rampa ascendente de 3 a 4%  |     |     |     |     |     |     |                      |      | Rampa descendente de 3 a 4% |
| 40   | 1,2   | 1,2 | 1,2 |     |     |     |     |                      | 0,70 |                             |
| 50   | 1,2   | 1,2 | 1,2 |     |     |     |     |                      | 0,70 |                             |
| 60   | 1,3   | 1,3 | 1,3 | 1,3 |     |     |     |                      | 0,70 |                             |
| 70   | 1,3   | 1,3 | 1,3 | 1,3 | 1,3 |     |     |                      | 0,65 |                             |
| 80   | 1,4   | 1,4 | 1,4 | 1,4 | 1,4 | 1,4 |     |                      | 0,65 |                             |
| 90   | 1,4   | 1,4 | 1,4 | 1,4 | 1,4 | 1,5 | 1,5 |                      | 0,65 |                             |
| 100  | 1,5   | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,6 | 1,6 | 1,6                  | 0,60 |                             |
| 110  | 1,5   | 1,5 | 1,5 | 1,6 | 1,6 | 1,7 | 1,7 | 1,7                  | 0,60 |                             |
| 120  | 1,6   | 1,6 | 1,6 | 1,7 | 1,7 | 1,8 | 1,8 | 1,8                  | 0,60 |                             |

| Rampa ascendente de 5 a 6% |     |     |     |     |     |     |     |  |                             |
|----------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--|-----------------------------|
|                            | 1,3 | 1,4 | 1,4 |     |     |     |     |  | Rampa descendente de 5 a 6% |
| 40                         | 1,3 | 1,4 | 1,4 |     |     |     |     |  | 0,60                        |
| 50                         | 1,3 | 1,4 | 1,4 |     |     |     |     |  | 0,60                        |
| 60                         | 1,4 | 1,5 | 1,5 | 1,5 |     |     |     |  | 0,60                        |
| 70                         | 1,4 | 1,5 | 1,6 | 1,6 | 1,8 |     |     |  | 0,55                        |
| 80                         | 1,4 | 1,5 | 1,6 | 1,7 | 1,9 | 2,0 |     |  | 0,55                        |
| 90                         | 1,5 | 1,6 | 1,7 | 1,8 | 2,0 | 2,2 | 2,3 |  | 0,55                        |
| 100                        | 1,6 | 1,7 | 1,8 | 1,9 | 2,2 | 2,3 | 2,5 |  | 0,50                        |
| 110                        | 1,9 | 2,0 | 2,0 | 2,2 | 2,6 | 2,8 | 3,0 |  | 0,50                        |
| 120                        | 2,0 | 2,1 | 2,2 | 2,3 | 2,7 | 2,8 | 3,0 |  | 0,50                        |

**EXEMPLO:** Dimensionar as faixas de aceleração e desaceleração para os ramos de entrada e de saída numa auto-estrada cuja velocidade de projeto é de 110 *km/h*. Admitir:

- transição pouco intenso na via.
- ramo de entrada com inclinação +3% e de saída com inclinação –3%.
- velocidade de projeto dos ramos de 50 *km/h*.

**Solução:**

Dados: Velocidade de projeto na via principal = 110 *km/h*.

Velocidade de projeto nos ramos = 50 *km/h*.

**Ramo de Entrada (faixa de aceleração)**

Da tabela 11.1, temos:

Comprimento do teiper,  $T = 90 \text{ m}$ .

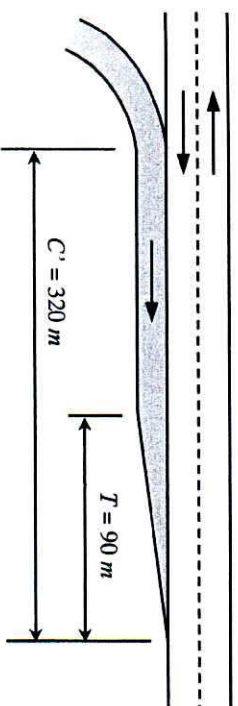
Comprimento total da faixa de aceleração,  $C = 200 \text{ m}$ .

Fator de correção para greide de +3% (tabela 11.2),  $f = 1,6$ .

Logo, o comprimento total corrigido da faixa de aceleração é:

$$C' = C \cdot f = 200 \cdot (1,6) = 320 \text{ m}$$

Faixa de aceleração

Ramo de Saída (faixa de desaceleração)

Da tabela 11.1, temos:

Comprimento do teiper,  $T = 90 \text{ m}$ .

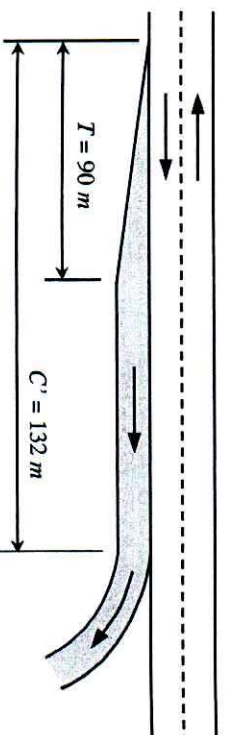
Comprimento total da faixa de desaceleração,  $C = 110 \text{ m}$ .

Fator de correção para greide de  $-3\%$  (tabela 11.2),  $f = 1,2$ .

Logo, o comprimento total corrigido da faixa de desaceleração é:

$$C' = C \cdot f = 110 \cdot (1,2) = 132 \text{ m}$$

Faixa de desaceleração

**INTERSEÇÕES EM DESNÍVEL OU INTERCONEXÕES**

Uma interconexão é um cruzamento em desnível, com uma ou mais rampas de conexão para movimentos entre as vias que se cruzam.

Nestes casos haverá necessidade de conceber uma obra de arte que separe verticalmente duas ou mais dessas vias cujos traçados se cruzam, permitindo dessa forma que os tráfegos não fiquem sujeitos a interferências.

Em locais onde existam grandes restrições de visibilidade, as interconexões podem ser utilizadas para solucionar pontos perigosos, sujeitos a acidentes. Quando os volumes de tráfego que se interceptam é elevado, uma interconexão pode ser a única solução viável.

As interconexões também podem ser aplicadas na eliminação de pontos de estrangulamento ou congestionamento localizados, onde o tráfego não pode ser atendido através de melhorias da interseção em nível. As características operacionais e a capacidade de uma interconexão podem ser consideravelmente melhoradas através da minimização do entrelaçamento.

Os ramos das interconexões, conforme suas características geométricas, podem ser classificados em direcionais, semidirecionais e laços (“loop”).

Os ramos direcionais são exigidos para altos volumes de conversão, visando com isso assegurar maior velocidade, menor distância e maior segurança (figura 11.5).

As saídas e entradas devem estar conectadas com a rodovia do lado direito (no sentido do tráfego). Isso irá minimizar manobras inesperadas e melhorar a operação por parte do motorista. A situação mais favorável é que haja um acesso de saída antes de um acesso de entrada, a fim de liberar parte do volume de tráfego.

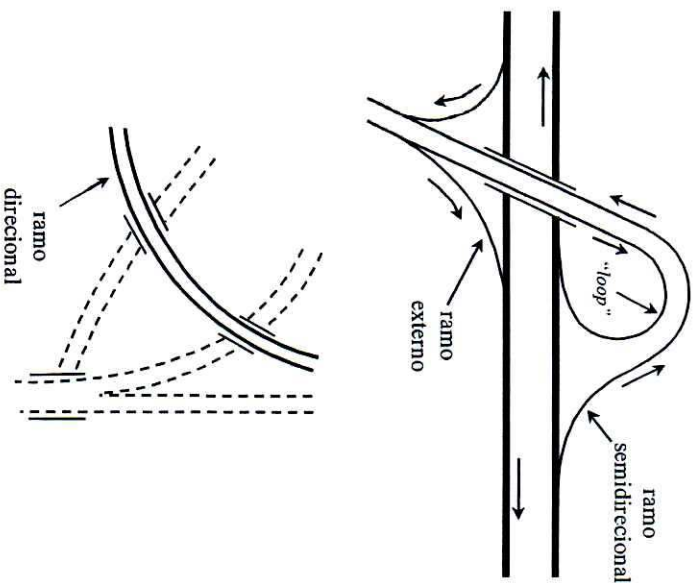
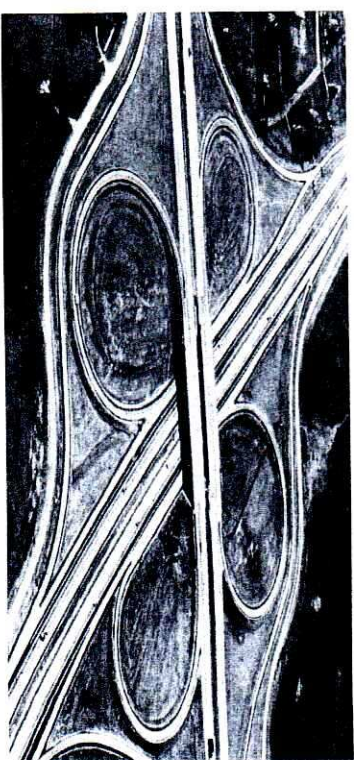


FIGURA 11.5 – Alguns tipos de ramos em interconexões.

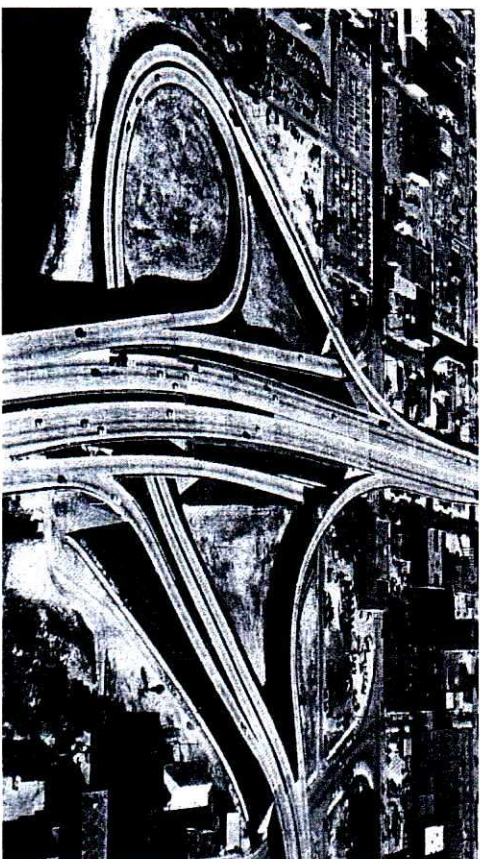
As interconexões de vias expressas constituem-se numa aplicação praticamente automática desse conceito, tendo em vista que, por definição, uma via expressa é uma via que opera sem interrupções no fluxo de tráfego em seus cruzamentos. O tipo mais simples de interconexão consiste em apenas uma simples rampa coletora entre duas rodovias que cruzam. Os esquemas dos tipos mais comuns de interconexões estão indicados a seguir.

- **TREVO COMPLETO**: têm rampas direcionais para todos os movimentos de conversão à direita e laços para os movimentos de conversão à esquerda. Quando os volumes de tráfego são elevados, podem surgir sérios problemas na operação do tráfego nos trechos localizados entre os laços.



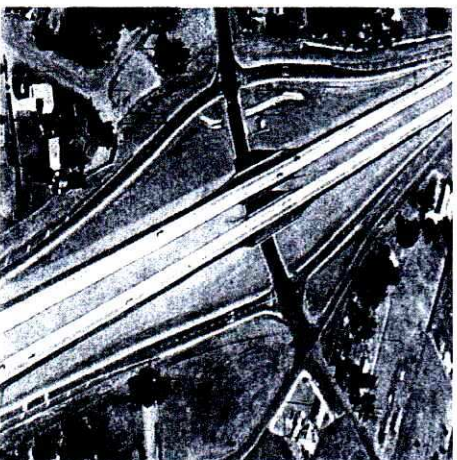
Fonte: AASHTO

- “T” E “Y”: têm apenas 3 ramos de aproximação. As interconexões tipo trombeta “A” e “B” apresentam rampas direcionais ou semidirecionais para apenas uma aproximação.



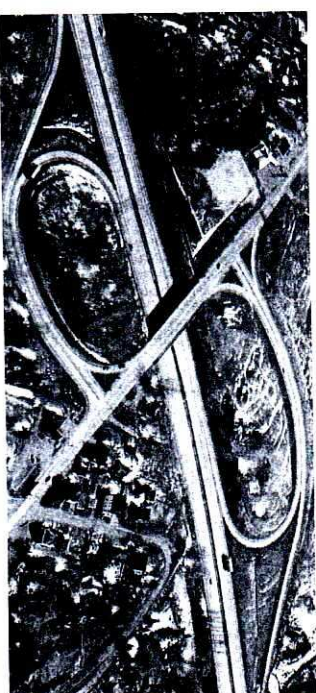
Fonte: AASHTO

- **DIAMANTE:** têm uma única saída antes da via de cruzamento e uma entrada simples após a via de cruzamento. As conexões na via de cruzamento são interseções em nível.



Fonte: AASHTO

- **TREVO PARCIAL:** estas interconexões têm dois laços de uma interconexão no formato trevo substituídos pelos movimentos de conversão à esquerda no cruzamento, e as rampas ocupam somente dois quadrantes da interconexão.



Fonte: AASHTO

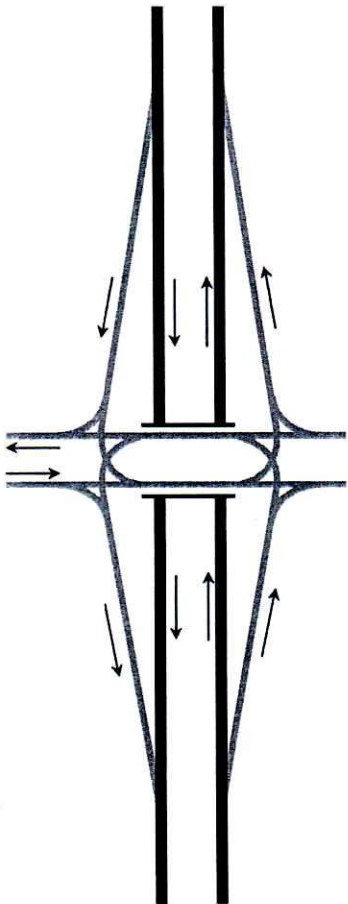
- **DIRECIONAIS:** um dos laços de conversão à esquerda na via de cruzamento é substituído por uma rampa direta. No caso de todas as conversões à esquerda feitas por rampas de acesso direto, a interconexão é chamada de “totalmente direcional”.



Fonte: AASHTO

## CARACTERÍSTICAS DAS INTERCONEXÕES

### DIAMANTE SIMPLES



#### Vantagens:

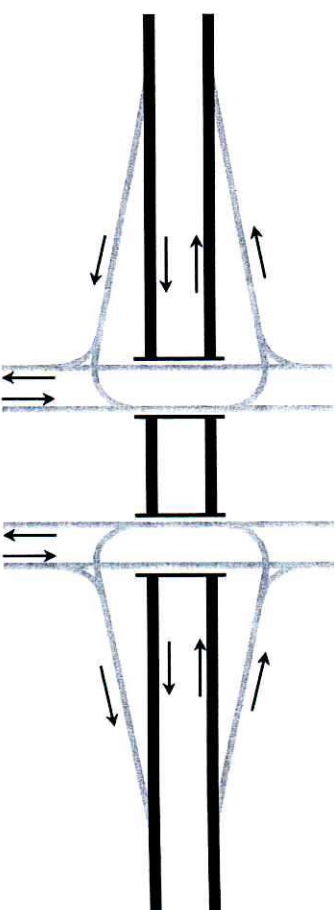
- As rampas de saída localizam-se antes da obra de arte.
- As rampas de entrada localizam-se depois da obra de arte.
- Estrutura relativamente econômica.
- Requer pouco espaço fora da área da rodovia.
- Conexões por rampas diretas.
- Evita entrelaçamento na estrada principal.
- Entradas e saídas simples.

#### Desvantagens:

- Muitos pontos de conflito na rodovia secundária.
- Possibilidade de manobras erradas.
- Requer canalização de tráfego na rodovia de cruzamento.
- Caso haja sinalização, é requerido um semáforo de 3 fases.
- Poucas possibilidades de alargamento futuro da estrutura.
- Tráfego de saída da estrada principal é obrigado a parar no final da rampa.

### DIAMANTE ABERTO

Esta interconexão é um caso particular da anterior. É utilizada quando existem duas estradas secundárias paralelas cruzando a principal, ambas com os dois sentidos de circulação.



#### Vantagens:

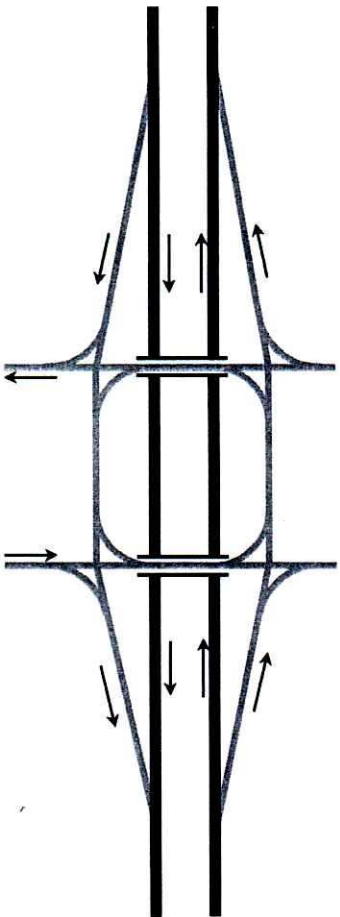
- Boa localização das rampas de saída e de entrada na estrada principal.
- Requer pouco espaço fora da área da rodovia.
- Conexões por rampas diretas.
- Evita entrelaçamento na estrada principal.
- Entrada e saída simples.
- Maior capacidade do que no diamante simples.
- Quando as estradas secundárias passam sobre a estrada principal, as rampas de saída e de entrada favorecem as manobras de desaceleração e aceleração.

#### Desvantagens:

- Muitos pontos de conflito na rodovia secundária.
- Possibilidade de movimentos errados nas rampas.
- Requer canalização de tráfego na rodovia de cruzamento.
- Custo adicional de mais uma obra de arte, em relação ao anterior.
- O tráfego que vira à esquerda na estrada secundária é obrigado a parar.

**DIAMANTE ABERTO COM UM SENTIDO DE CIRCULAÇÃO**

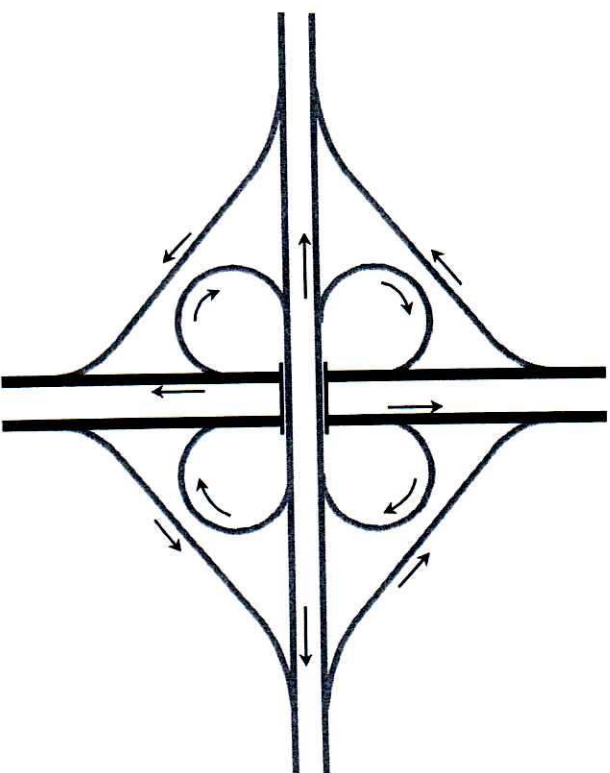
Outro caso particular do diamante simples, em que a estrada secundária tem duas faixas independentes com um único sentido de circulação.

**Vantagens:**

- As rampas de saída localizam-se antes da obra de arte.
- Estrutura relativamente econômica.
- Requer pouco espaço fora da área da rodovia.
- Conexões por rampas diretas.
- Evita entrelaçamento na via.
- Entrada e saída simples.
- Quando as estradas secundárias passam sobre a estrada principal, as rampas de saída e de entrada favorecem as manobras de desaceleração e aceleração.
- Aumento da capacidade em relação aos outros tipos de interconexão em diamante.

**Desvantagens:**

- Possibilidade de movimentos errados nas rampas.
- Requer canalização de tráfego na rodovia de cruzamento.
- Custo adicional de mais uma obra de arte.
- O tráfego que vira à esquerda na estrada secundária é obrigado a parar.

**TREVO COMPLETO****Vantagens:**

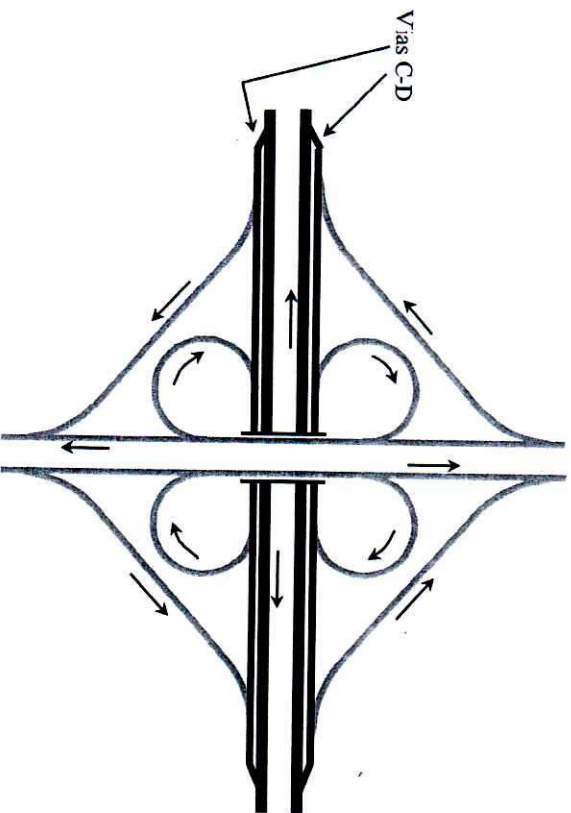
- Fluxo contínuo e natural para todos os movimentos.
- Não conduz a movimentos errados na via.
- Sinalização semafórica desnecessária.
- Pode ser construído por fases.

**Desvantagens:**

- Exige grandes áreas.
- Capacidade limitada em função do entrelaçamento.
- Exige acessos separados para a via de cruzamento.
- Apresenta comprimentos insuficientes de vias de desaceleração, em geral.

### TREVO COMPLETO COM VIAS C-D (Coletoras - Distribuidoras)

Representa uma solução em trevo semelhante ao trevo mostrado anteriormente, onde foi introduzida de cada lado da estrada principal uma via coletora-distribuidora. Todas as manobras de saída, entrada e entrelaçamento passam a efetuar-se nestas vias.



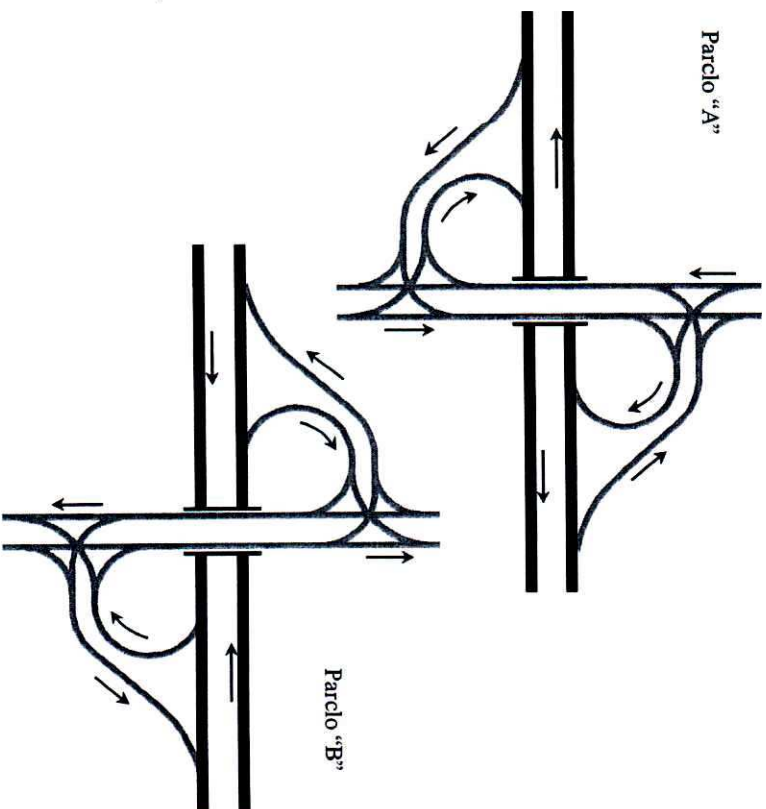
#### Vantagens:

- Os entrelaçamentos são deslocados para as vias C-D.
- Não conduz a movimentos errados na via.
- Maior capacidade que o trevo simples.
- O número de entradas e saídas na estrada principal passa de 8 para 4.

#### Desvantagens:

- Exige grandes áreas, com elevados custos de construção.

### TREVO PARCIAL (Parclo – *Partial Cloverleaf*)



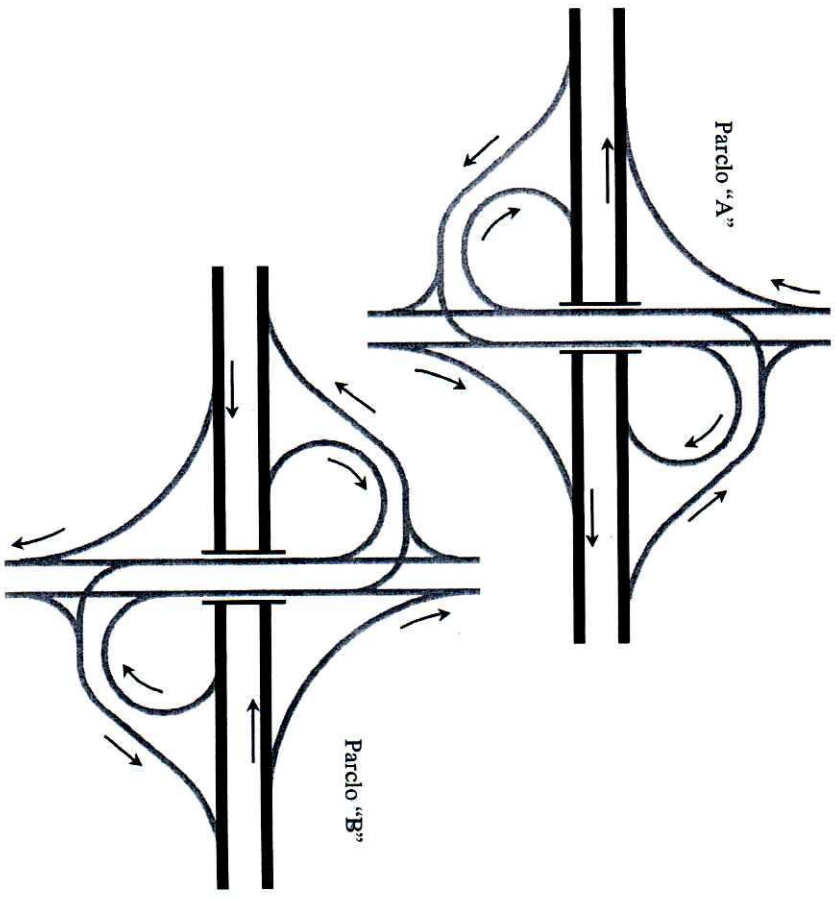
#### Vantagens:

- Os entrelaçamentos são eliminados.
- Favorece o tráfego mais rápido na estrada principal devido às rampas de saída se localizarem antes da obra de arte (Parclo "A").
- Possibilidade de melhorias futuras.

#### Desvantagens:

- Pontos de conflito na estrada secundária limitam a capacidade.
- Requer canalização do tráfego na rodovia secundária.

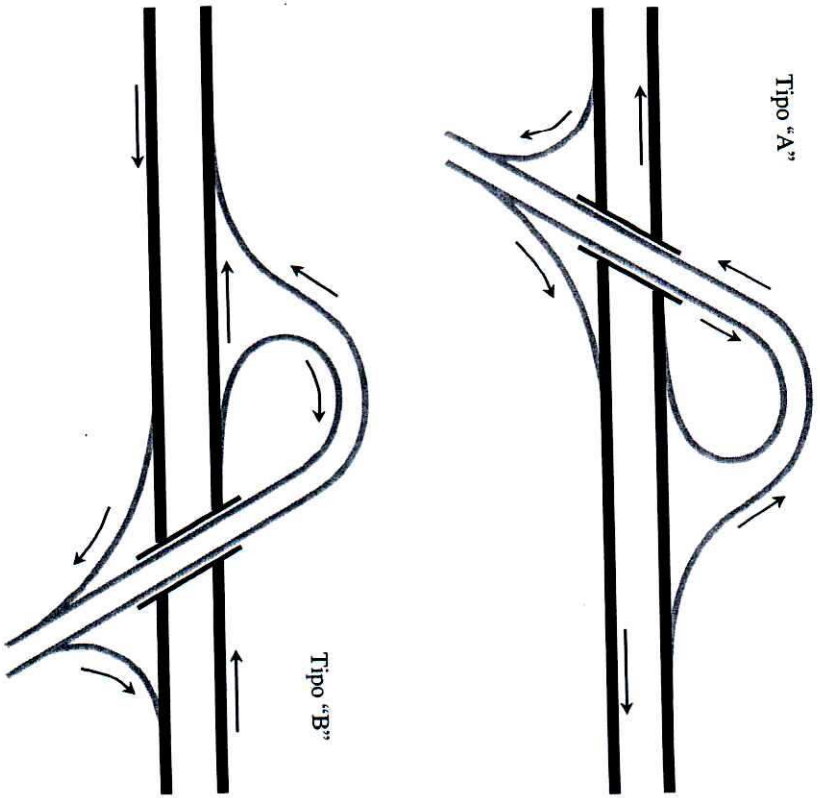
### TREVO PARCIAL (Parclo – 4 quadrantes)



- Vantagens:**
- Evita entrelaçamento.
  - Não conduz a movimentos errados.
  - Alta capacidade de tráfego.
  - Sinalização facilmente realizável.

- Desvantagens:**
- Custos mais elevados
  - Exige grandes áreas para implantação.

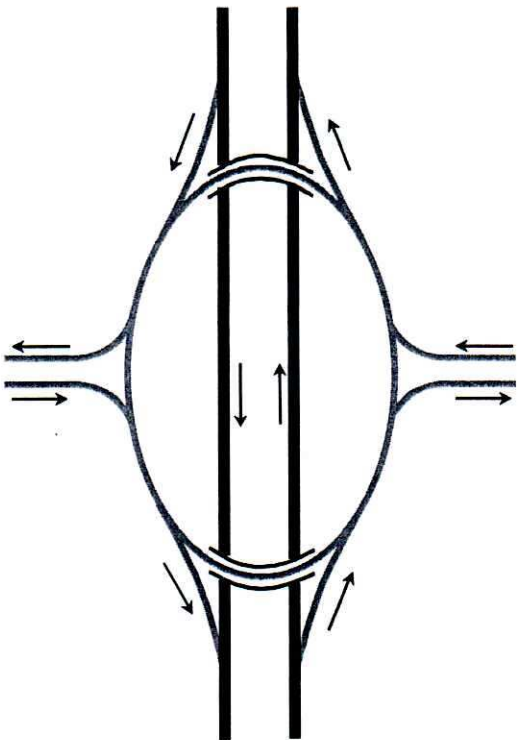
### TROMBETA



- Vantagens:**
- Requer uma única obra de arte.
  - Não existe entrelaçamento.
  - Alta capacidade de tráfego.
  - Movimentos semidirecionais a grandes velocidades.



### INTERCONEXÃO GIRATÓRIA



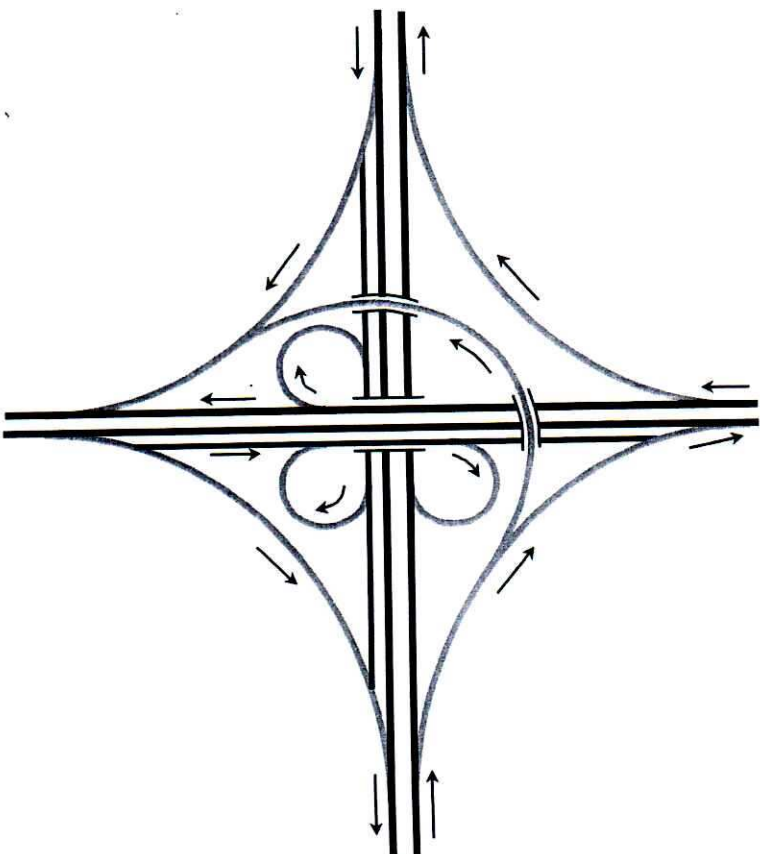
#### Vantagens:

- Solução relativamente simples em zonas rurais onde existem 4 ou mais estradas que se cruzam, com volumes relativamente pequenos.

#### Desvantagens:

- Requer grandes áreas para implantação.
- Entrelaçamentos limitam a capacidade.
- Elevado custo de construção de obras de arte.
- Similização direcional difícil de aplicar, a menos que o diâmetro do círculo seja suficientemente grande.

### INTERCONEXÕES DIRECIONAIS



#### Vantagens:

- Podem ter excelentes características operacionais.
- Acomodam grandes volumes de tráfego.

#### Desvantagens:

- Exigem grandes áreas.
- Construção bastante onerosa.

## ESCOLHA DO TIPO DE INTERCONEXÃO

Uma avaliação da capacidade operacional em conjunto com uma análise de viabilidade deve ser desenvolvida a fim determinar qual a melhor interconexão a ser utilizada, bem como suas características. O ábaco a seguir resume as recomendações para a definição do tipo de interseções em áreas rurais.

| CLASSE DA RODOVIA | CLASSE DA RODOVIA                  |   |                       |                                  |
|-------------------|------------------------------------|---|-----------------------|----------------------------------|
|                   | 0                                  | I | II                    | III                              |
| 0                 | Projeto especial                   |   | Diamante              | Greides em dois níveis           |
| I                 | Interseção em trevo ou equivalente |   | Diamante              | Fechar ou separar em dois níveis |
| II                | Diamante                           |   | Interseção canalizada |                                  |
| III               | Greides em dois níveis             |   |                       | Interseção em nível simples      |
| IV                | Fechar ou separar em dois níveis   |   |                       |                                  |

FIGURA 11.6 – Recomendações para a definição do tipo de interseções em áreas rurais (DNER).

## RESPOSTAS DOS EXERCÍCIOS

### CAPÍTULO 2

- 1) 120,25 m
- 2)  $d_1 = 5.385,16 \text{ m}$   
 $d_2 = 4.242,64 \text{ m}$   
 $d_3 = 3.605,55 \text{ m}$   
 $d_4 = 5.099,02 \text{ m}$   
 $\Delta_1 = 48,37^\circ$   
 $\Delta_2 = -22,38^\circ$
- 3) a
- 4) c
- 5) b
- 6) c
- 7)  $d_1 = 5.830,95 \text{ m}$   
 $d_2 = 5.656,85 \text{ m}$   
 $d_3 = 5.385,17 \text{ m}$   
 $\Delta_1 = -104,04^\circ$   
 $\Delta_2 = 23,20^\circ$

**CAPÍTULO 4**

- 1)  $T = 42,02 \text{ m}$ ;  $E = 8,84 \text{ m}$
- 2)  $T = 85,07 \text{ m}$ ;  $R = 233,73 \text{ m}$
- 3)  $T = 349,83 \text{ m}$ ;  $E = 49,17 \text{ m}$
- 4)  $d = 3,8197^\circ$
- 5)  $G = 1,6480^\circ$
- 6)  $T = 110,43 \text{ m}$ ;  $D = 215,72 \text{ m}$
- 7)  $E(PC) = 37 + 6,17$ ;  $E(PT) = 48 + 1,89$
- 8)  $R = 286,48 \text{ m}$ ;  $d = 2^\circ$ ;  $dm = 6'$ ;  $ds_1 = 7,2'$ ;  $ds_{pt} = 58,8'$
- 9)  $R = 190,987 \text{ m}$ ;  $T = 83,44 \text{ m}$ ;  $E = 17,43 \text{ m}$ ;  $D = 157,33 \text{ m}$ ;  
 $E(PC) = 54 + 8,56$ ;  $E(PT) = 62 + 5,89$
- 10)  $E(PC) = 344 + 9,05$ ;  $E(PT) = 376 + 6,10$
- 11)  $G_{20} = 0,9159^\circ$ ;  $D = 493,50 \text{ m}$
- 12)  $D = 851,16 \text{ m}$
- 13)  $d$
- 14) Utilizar a relação  $(1 - \cos x)/\sin x = \tan(x/2)$
- 15)  $G = 1,6852^\circ$ ;  $T = 182,21 \text{ m}$ ;  $D = 356,05 \text{ m}$ ;  
 $E(PC) = 196 + 0,31$ ;  $E(PT) = 213 + 16,36$
- 16)  $91 \text{ est} + 0,23 \text{ m}$
- 17)  $R_1 = 541,46 \text{ m}$ ;  $R_2 = 298,10 \text{ m}$
- 18)  $R = 428,28 \text{ m}$
- 19)  $R_2' = 772,38 \text{ m}$
- 20)  $436,02 \text{ m}$

- 21)  $E(PI_1) = 54 + 0,00$   
 $E(PI_2) = 158 + 5,93$   
 $E(F) = 247 + 15,35$
- 24)  $E(PC_1) = 323 + 17,02$   
 $E(PC_2) = 428 + 11,65$   
 $E(PT_1) = 362 + 4,97$   
 $E(PT_2) = 474 + 7,95$   
 $E(PI_1) = 343 + 17,39$   
 $E(PI_2) = 452 + 4,60$   
 $E(A) = 293 + 17,39$
- 25) a)  $R = 1173,98 \text{ m}$ ; b)  $R = 1044,05 \text{ m}$
- 26)  $E(PC) = 51 + 19,00$ ;  $E(PT) = 99 + 1,48$
- 27)  $E(PI_1) = 825 + 0,00$ ;  $E(PT_2) = 841 + 5,23$   
 $R_1 = 241,42 \text{ m}$ ;  $R_2 = 100,00 \text{ m}$
- 28)  $R = 181,05 \text{ m}$
- 29) caminho 1:  $842,69 \text{ m}$ ; caminho 2:  $872,66 \text{ m}$
- 30)  $13.474,69 \text{ m}$
- 34)  $C = 1.103,09$ ;  $R_1 = 857,21 \text{ m}$ ;  $R_2 = 850,42 \text{ m}$
- 35)  $\Delta_1 = \Delta_3 = 18,97^\circ$ ;  $\Delta_2 = 52,07^\circ$ ;  $T = 33,28 \text{ m}$ ;  $T_1 = 21,90 \text{ m}$ ;  
 $T_2 = 15,40 \text{ m}$ ;  $d = 18,12 \text{ m}$ ;  $X = 17,88 \text{ m}$ ;  $Y = 2,99 \text{ m}$
- 36) a)  $R_{\min} = 314,96 \text{ m}$ ;  $D_p = 200,72 \text{ m}$ ; afastamento necessário =  $8,24 \text{ m}$   
b)  $T = 84,39 \text{ m}$ ;  $D = 164,91 \text{ m}$   
c)  $X_{pc} = 73,08 \text{ m}$ ;  $Y_{pc} = 42,20 \text{ m}$ ;  $X_{pt} = 84,39 \text{ m}$ ;  $Y_{pt} = 0$

**CAPÍTULO 5**

- 3) 222 est + 16,34 m
- 4)  $X = 50,83 \text{ m}$   
 $Y = 0,41 \text{ m}$
- 5)  $L_{S_2} = 108,25 \text{ m}$ . Não é possível, pois  $E(TS_2) < E(ST_1)$
- 6) 72 km/h
- 7) a)  $J = 0,54 \text{ m/s}^3$   
b)  $p = 1,89 \text{ m}$   
c)  $D = 12,32 \text{ m}$
- 8)  $E(TS_1) = 42 + 13,62$   
 $E(SC_1) = 43 + 13,62$   
 $E(CS_1) = 53 + 3,06$   
 $E(ST_1) = 57 + 3,06$   
 $E(PC_2) = 67 + 3,06$   
 $E(PT_2) = 77 + 12,51$   
 $E(F) = 122 + 6,23$
- 9)  $X = 53,0 \text{ m}$   
 $Y = 0,47 \text{ m}$
- 10)  $i = 1,139^\circ$
- 11)  $(E; N) = (442,61 ; -281,53)$
- 12)  $(E; N) = (24,78 ; 108,80)$
- 13) Vide exemplo resolvido nº 1.

**CAPÍTULO 6**

- 1)  $R_{\min} = 374,95 \text{ m}$   
 $e = 6,9\%$
- 2)  $R_{\min} = 251,97 \text{ m}$   
 $e = 5,2\%$

**CAPÍTULO 7**

- 1) 0,62
- 2) 0,39
- 3) 0,48
- 4) a) 0,88  
b) 0,70
- 5) 0,53

**CAPÍTULO 8**1)  $L = 160 \text{ m}$ 

$E(\text{PCV}) = 70 + 0,00$

$E(\text{PTV}) = 78 + 0,00$

$E(\text{V}) = 72 + 0,00$

$\text{Cota}(\text{PCV}) = 669,20 \text{ m}$

$\text{Cota}(\text{PTV}) = 667,60 \text{ m}$

$\text{Cota}(\text{V}) = 669,40 \text{ m}$

| ESTACA          | COTAS DO GREIDE RETO | $f$  | COTAS DO GREIDE DE PROJETO |
|-----------------|----------------------|------|----------------------------|
| (PCV) 70 + 0,00 | 669,20               | 0    | 669,20                     |
| 71              | 669,40               | 0,05 | 669,35                     |
| 72              | 669,60               | 0,20 | 669,40                     |
| 73              | 669,80               | 0,45 | 669,35                     |
| (PIV) 74 + 0,00 | 670,00               | 0,80 | 669,20                     |
| 75              | 669,40               | 0,45 | 668,95                     |
| 76              | 668,80               | 0,20 | 668,60                     |
| 77              | 668,20               | 0,05 | 668,15                     |
| (PTV) 78 + 0,00 | 667,60               | 0    | 667,60                     |

2)  $E(\text{PCV}) = 68 + 0,00$ 

$E(\text{PTV}) = 84 + 0,00$

$E(\text{V}) = 73 + 6,67$

$\text{Cota}(\text{PCV}) = 558,20$

$\text{Cota}(\text{PTV}) = 561,40$

$\text{Cota}(\text{V}) = 557,13$

| ESTACA          | COTAS DO GREIDE RETO | $f$   | COTAS DO GREIDE DE PROJETO |
|-----------------|----------------------|-------|----------------------------|
| (PCV) 68 + 0,00 | 558,20               | 0,00  | 558,20                     |
| 69              | 557,80               | -0,04 | 557,84                     |
| 70              | 557,40               | -0,15 | 557,55                     |
| 71              | 557,00               | -0,34 | 557,34                     |
| 72              | 556,60               | -0,60 | 557,20                     |
| 73              | 556,20               | -0,94 | 557,14                     |
| 74              | 555,80               | -1,35 | 557,15                     |
| 75              | 555,40               | -1,84 | 557,24                     |
| (PIV) 76 + 0,00 | 555,00               | -2,40 | 557,40                     |
| 77              | 555,80               | -1,84 | 557,64                     |
| 78              | 556,60               | -1,35 | 557,95                     |
| 79              | 557,40               | -0,94 | 558,34                     |
| 80              | 558,20               | -0,60 | 558,80                     |
| 81              | 559,00               | -0,34 | 559,34                     |
| 82              | 559,80               | -0,15 | 559,95                     |
| 83              | 560,60               | -0,04 | 560,64                     |
| (PTV) 84 + 0,00 | 561,40               | 0,00  | 561,40                     |

3)  $E(PCV) = 45 + 0,00$

$E(PTV) = 55 + 0,00$

Cota(PCV) = 124,00

Cota(PTV) = 119,00

| ESTACA           | COTAS DO GREIDE RETO | f    | COTAS DO GREIDE DE PROJETO |
|------------------|----------------------|------|----------------------------|
| (PCV) 45 + 0,00  | 124,00               | 0,00 | 124,00                     |
| 46               | 123,80               | 0,03 | 123,77                     |
| 47               | 123,60               | 0,12 | 123,48                     |
| 48               | 123,40               | 0,27 | 123,13                     |
| 49               | 123,20               | 0,48 | 122,72                     |
| (PIV) 50 + 0,00  | 123,00               | 0,75 | 122,25                     |
| 51               | 122,20               | 0,48 | 121,72                     |
| 52               | 121,40               | 0,27 | 121,13                     |
| 53               | 120,60               | 0,12 | 120,48                     |
| 54               | 119,80               | 0,03 | 119,77                     |
| (PTV) 54 + 10,00 | 119,00               | 0,00 | 119,00                     |

4)  $E(PCV) = 30 + 0,00$

$E(PTV) = 50 + 0,00$

Cota(PCV) = 82,00

Cota(PTV) = 90,00

| ESTACA          | COTAS DO GREIDE RETO | f    | COTAS DO GREIDE DE PROJETO |
|-----------------|----------------------|------|----------------------------|
| (PCV) 30 + 0,00 | 82,00                | 0,00 | 82,00                      |
| 31              | 82,51                | 0,01 | 82,50                      |
| 32              | 83,00                | 0,02 | 82,98                      |
| 33              | 83,51                | 0,05 | 83,46                      |
| 34              | 84,00                | 0,08 | 83,92                      |
| 35              | 84,51                | 0,13 | 84,38                      |
| 36              | 85,00                | 0,18 | 84,82                      |
| 37              | 85,51                | 0,25 | 85,26                      |
| 38              | 86,00                | 0,32 | 85,68                      |
| 39              | 86,51                | 0,41 | 86,10                      |
| (PIV) 40 + 0,00 | 87,00                | 0,50 | 86,50                      |
| 41              | 87,31                | 0,41 | 86,90                      |
| 42              | 87,60                | 0,32 | 87,28                      |
| 43              | 87,91                | 0,25 | 87,66                      |
| 44              | 88,20                | 0,18 | 88,02                      |
| 45              | 88,51                | 0,13 | 88,38                      |
| 46              | 88,80                | 0,08 | 88,72                      |
| 47              | 89,11                | 0,05 | 89,06                      |
| 48              | 89,40                | 0,02 | 89,38                      |
| 49              | 89,71                | 0,01 | 89,70                      |
| (PTV) 50 + 0,00 | 90,00                | 0,00 | 90,00                      |

5)  $E(PCV) = 79 + 0,00$

$E(PTV) = 89 + 0,00$

$Cota(PCV) = 668,80$

$Cota(PTV) = 673,60$

| ESTACA          | COTAS DO GREIDE RETO | $f$   | COTAS DO GREIDE DE PROJETO |
|-----------------|----------------------|-------|----------------------------|
| (PCV) 79 + 0,00 | 668,80               | 0,00  | 668,80                     |
| 80              | 669,04               | -0,02 | 669,06                     |
| 81              | 669,28               | -0,10 | 669,38                     |
| 82              | 669,52               | -0,22 | 669,74                     |
| 83              | 669,76               | -0,38 | 670,14                     |
| (PIV) 84 + 0,00 | 670,00               | -0,60 | 670,60                     |
| 85              | 670,72               | -0,38 | 671,10                     |
| 86              | 671,44               | -0,22 | 671,66                     |
| 87              | 672,16               | -0,10 | 672,26                     |
| 88              | 672,88               | -0,02 | 672,90                     |
| (PTV) 89 + 0,00 | 673,60               | 0,00  | 673,60                     |

6)  $E(PCV_1) = 5 + 10,00$

$E(PTV_1) = 44 + 10,00$

$E(V_1) = 17 + 10,00$

$Cota(PCV_1) = 102,20 \text{ m}$

$Cota(PTV_1) = 92,45 \text{ m}$

$Cota(V_1) = 104,60 \text{ m}$

$E(PCV_2) = 45 + 8,00$

$E(PTV_2) = 60 + 12,00$

$E(V_2) = 54 + 8,00$

$Cota(PCV_2) = 91,64 \text{ m}$

$Cota(PTV_2) = 89,51 \text{ m}$

$Cota(V_2) = 87,39 \text{ m}$

7)

| ESTACA          | COTAS DO GREIDE RETO | $f$    | COTAS DO GREIDE DE PROJETO |
|-----------------|----------------------|--------|----------------------------|
| PCV = 45+8,00   | 91,640               | 0,000  | 91,640                     |
| 46              | 91,100               | -0,018 | 91,118                     |
| 47              | 90,200               | -0,128 | 90,328                     |
| 48              | 89,300               | -0,338 | 89,638                     |
| 49              | 88,400               | -0,648 | 89,048                     |
| 50              | 87,500               | -1,058 | 88,558                     |
| 51              | 86,600               | -1,568 | 88,168                     |
| 52              | 85,700               | -2,178 | 87,878                     |
| PIV = 53 + 0,00 | 84,800               | -2,888 | 87,688                     |
| 54              | 85,420               | -2,178 | 87,598                     |
| V = 54 + 8,00   | 85,668               | -1,922 | 87,590                     |
| 55              | 86,040               | -1,568 | 87,608                     |
| 56              | 86,660               | -1,058 | 87,718                     |
| 57              | 87,280               | -0,648 | 87,928                     |
| 58              | 87,900               | -0,338 | 88,238                     |
| 59              | 88,520               | -0,128 | 88,648                     |
| 60              | 89,140               | -0,018 | 89,158                     |
| PTV = 60+12,00  | 89,512               | 0,000  | 89,512                     |

18)

| EST. | ALINHAMENTOS | COTAS (m)   |         | f     | GREIDE DE PROJETO | COTAS VERMELHAS |            |
|------|--------------|-------------|---------|-------|-------------------|-----------------|------------|
|      |              | GREIDE RETO | TERRENO |       |                   | CORTE (+)       | ATERRO (-) |
| 30   | PCV          | 103,415     | 101,000 | 0,000 | 101,000           | 2,415           |            |
| +10  |              | 104,785     | 101,250 | 0,011 | 101,239           | 3,546           |            |
| 31   |              | 104,914     | 101,500 | 0,045 | 101,455           | 3,459           |            |
| +10  |              | 105,112     | 101,750 | 0,101 | 101,649           | 3,463           |            |
| 32   |              | 105,222     | 102,000 | 0,180 | 101,820           | 3,402           |            |
| +10  |              | 105,317     | 102,250 | 0,281 | 101,969           | 3,348           |            |
| 33   |              | 105,419     | 102,500 | 0,405 | 102,095           | 3,324           |            |
| +10  |              | 105,613     | 102,750 | 0,551 | 102,199           | 3,414           |            |
| 34   |              | 105,712     | 103,000 | 0,720 | 102,280           | 3,432           |            |
| +10  |              | 105,801     | 103,250 | 0,911 | 102,339           | 3,462           |            |
| 35   | PIV          | 105,903     | 103,500 | 1,125 | 102,375           | 3,528           |            |
| +10  |              | 105,793     | 103,300 | 0,911 | 102,389           | 3,404           |            |
| 36   |              | 105,685     | 103,100 | 0,720 | 102,380           | 3,305           |            |
| +10  |              | 105,417     | 102,900 | 0,551 | 102,349           | 3,068           |            |
| 37   |              | 105,335     | 102,700 | 0,405 | 102,295           | 3,040           |            |
| +10  |              | 105,127     | 102,500 | 0,281 | 102,219           | 2,908           |            |
| 38   |              | 104,295     | 102,300 | 0,180 | 102,120           | 2,175           |            |
| +10  |              | 104,015     | 102,100 | 0,101 | 101,999           | 2,016           |            |
| 39   |              | 103,970     | 101,900 | 0,045 | 101,855           | 2,115           |            |
| +10  |              | 103,950     | 101,700 | 0,011 | 101,689           | 2,261           |            |
| 40   | PTV          | 103,550     | 101,500 | 0,000 | 101,500           | 2,050           |            |
|      |              |             |         |       |                   |                 |            |

- 19) b
- 21)  $i_1 = -5\%$ ;  $i_2 = +5\%$ ;  $i_3 = -1,25\%$       Fim do Túnel: 416 m
- 23) Início do túnel: 128 m;      Fim do viaduto: 525 m
- Início do viaduto: 416 m;      Fim do viaduto: 525 m
- $i_{AB} = 13,6\% > i_{\max}$  (não é possível interligar)

**CAPÍTULO 9**

1)

| EST   | ÁREAS (m <sup>2</sup> ) |        | VOLUMES (m <sup>3</sup> ) |         |                  |               |               |                |           |
|-------|-------------------------|--------|---------------------------|---------|------------------|---------------|---------------|----------------|-----------|
|       | Corte                   | Aterro | Corte                     | Aterro  | Aterro Corrigido | COMP. LATERAL | Corte (Long.) | Aterro (Long.) | Acumulado |
| 0     | 10,15                   | 17,15  |                           |         |                  |               |               |                | 121,85    |
| 1     | 27,50                   | 6,00   | 376,50                    | 231,50  | 254,65           | 254,65        | 121,85        | -----          | 121,85    |
| 2     | 76,98                   | -----  | 1064,80                   | 60,00   | 66,00            | 66,00         | 998,80        | -----          | 1120,65   |
| 3     | 63,10                   | -----  | 1420,80                   | -----   | -----            | -----         | 1420,80       | -----          | 2541,45   |
| 4     | 35,65                   | 3,25   | 987,50                    | 32,50   | 37,75            | 37,75         | 949,75        | -----          | 3491,20   |
| +8,60 | 9,10                    | 12,95  | 447,50                    | 162,00  | 178,20           | 178,20        | 289,30        | -----          | 3780,50   |
| 5     | -----                   | 65,10  | 91,00                     | 780,50  | 858,55           | 91,00         | -----         | 767,55         | 2992,95   |
| 6     | -----                   | 65,50  | -----                     | 1306,00 | 1436,60          | -----         | -----         | 1436,60        | 1556,35   |
| 7     | -----                   | 104,44 | -----                     | 1699,40 | 1869,34          | -----         | -----         | 1699,34        | -312,99   |
| 8     | -----                   | 48,02  | -----                     | 1524,60 | 1677,06          | -----         | -----         | 1677,06        | -1890,05  |
| 9     | 6,25                    | 25,65  | 62,50                     | 736,70  | 810,37           | 62,50         | -----         | 747,87         | -2737,92  |
| +5,43 | 2,82                    | 2,80   | 88,70                     | 294,50  | 312,95           | 88,70         | -----         | 224,25         | -2862,17  |



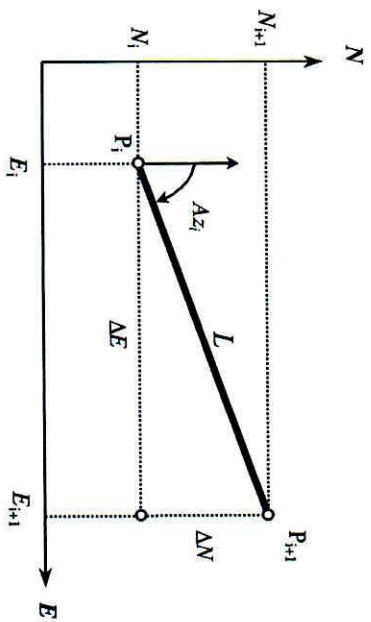
- 2) a) 120.000  $m^3$   
b) 20.000  $m^3$   
c)  $\approx 1,7 \cdot 10^6 m^3 \cdot dam$   
d) 60.000  $m^2$ ; 80.000  $m^3$
- 3) a) 6.000  $m^3$   
b) 10.000  $m^3$   
c) 18.000  $m^3$   
d)  $\approx 1,65 \cdot 10^5 m^3 \cdot dam$
- 4) b
- 5) d
- 6) a) 28.000  $m^3$   
b) 12.000  $m^3$   
c) linha 1:  $\approx 4,1 \cdot 10^5 m^3 \cdot dam$ ; linha 2:  $\approx 4,5 \cdot 10^5 m^3 \cdot dam$   
d) linha 1
- 7) a) 20.000  $m^3$   
b) 15.000  $m^3$   
c) 20.000  $m^3$   
d) 35.000  $m^3$   
e) 10, 20, 30, 45, 60 e 70
- 8) 740
- 9) 40,5 u.a.
- 10) 2.853,33
- 11) 1,9%



## ANEXO I

## RESUMO DE FÓRMULAS E EQUAÇÕES

### AZIMUTES E ÂNGULOS DE DEFLEXÃO



$$Az_i = \arctan \left( \frac{E_{i+1} - E_i}{N_{i+1} - N_i} \right) \quad (0^\circ \leq Az_i \leq 90^\circ)$$

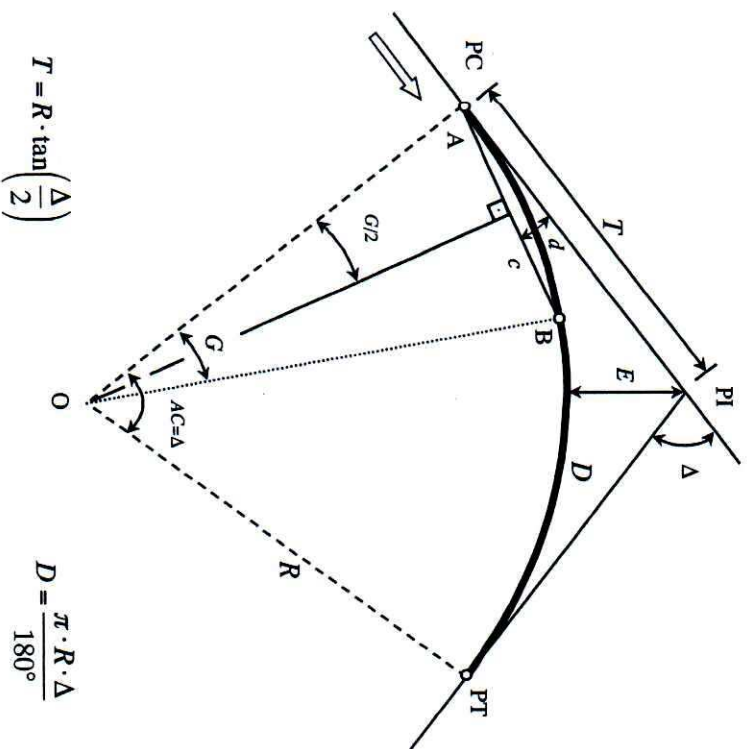
$$Az_i = 180^\circ + \arctan \left( \frac{E_{i+1} - E_i}{N_{i+1} - N_i} \right) \quad (90^\circ < Az_i \leq 180^\circ)$$

$$L = \sqrt{(E_{i+1} - E_i)^2 + (N_{i+1} - N_i)^2} = \sqrt{(\Delta E)^2 + (\Delta N)^2}$$

$$\text{Deflexão} = \text{Azimute}_{i+1} - \text{Azimute}_n$$

| QUADRANTE | AZIMUTE                         |
|-----------|---------------------------------|
| NE        | $A_z = \text{Rumo}$             |
| SE        | $A_z = 180^\circ - \text{Rumo}$ |
| SW        | $A_z = 180^\circ + \text{Rumo}$ |
| NW        | $A_z = 360^\circ - \text{Rumo}$ |

### CURVAS HORIZONTAIS CIRCULARES SIMPLES



$$T = R \cdot \tan \left( \frac{\Delta}{2} \right)$$

$$E = T \cdot \tan \left( \frac{\Delta}{4} \right)$$

$$D = \frac{\pi \cdot R \cdot \Delta}{180^\circ}$$

$$E(PT) = E(PI) - [T] \quad E(PT) = E(PC) + [D]$$

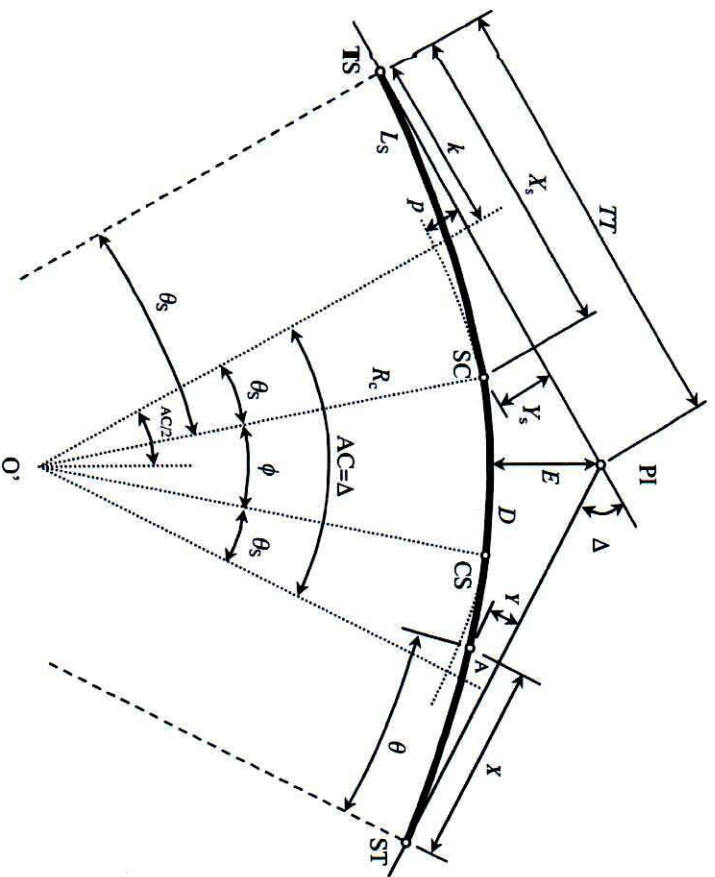
$$G = \frac{180^\circ \cdot c}{\pi \cdot R}$$

$$G = 2 \cdot \arcsen \left( \frac{c}{2R} \right)$$

$$d = \frac{G}{2}$$

$$dm = \frac{G}{2 \cdot c}$$

## CURVAS DE TRANSIÇÃO



$$Ls_{\min} = 0,036 \cdot \frac{V^3}{R_c}$$

$$Ls_{\max} = \frac{R_c \cdot \Delta \cdot \pi}{180^\circ}$$

$$\theta_s = \frac{L_s}{2 \cdot R_c}$$

$$\phi = \Delta - 2 \cdot \theta_s$$

$$X_s = L_s \cdot \left( 1 - \frac{\theta_s^2}{10} + \frac{\theta_s^4}{216} \right)$$

$$Y_s = L_s \cdot \left( \frac{\theta_s}{3} - \frac{\theta_s^3}{42} \right)$$

$$D = \frac{R_c \cdot \phi \cdot \pi}{180^\circ}$$

$$\theta = \frac{L^2}{2 \cdot R_c \cdot L_s}$$

$$k = X_s - R_c \cdot \text{sen} \theta_s$$

$$p = Y_s - R_c \cdot (1 - \text{cos} \theta_s)$$

$$TT = k + (R_c + p) \cdot \tan \left( \frac{\Delta}{2} \right)$$

$$E = \frac{R_c + p}{\text{cos}(\Delta/2)} - R_c$$

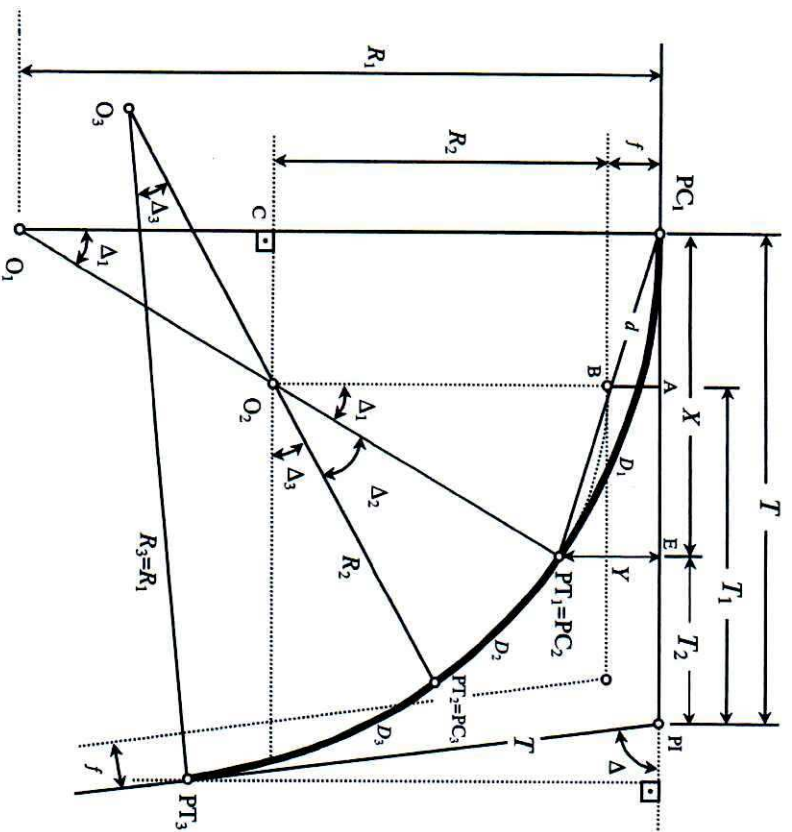
$$E(TS) = E(PI) - [TT]$$

$$E(SC) = E(TS) + [L_s]$$

$$E(CS) = E(SC) + [D]$$

$$E(ST) = E(CS) + [L_s]$$

## CURVA COMPOSTA COM 3 CENTROS (acesso-tipo DERSA/SP)



$$\Delta_2 = \Delta - (\Delta_1 + \Delta_3)$$

$$\Delta_1 = \Delta_3 = \arccos \left( \frac{R_1 - (R_2 + f)}{R_1 - R_2} \right)$$

$$T_1 = (R_2 + f) \cdot \tan \left( \frac{\Delta}{2} \right)$$

$$T = (R_2 + f) \cdot \tan \left( \frac{\Delta}{2} \right) + [R_1 - (R_2 + f)] \cdot \tan \Delta_1$$

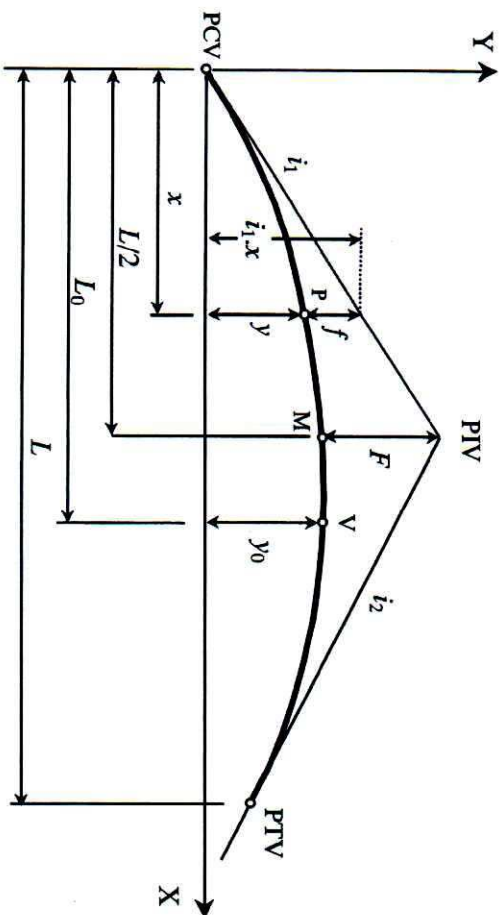
$$d = R_1 \cdot \frac{\text{sen } \Delta_1}{\cos(\Delta_1/2)}$$

$$X = R_1 \cdot \text{sen } \Delta_1$$

$$Y = R_1 \cdot \text{sen}(\Delta_1) \cdot \tan \left( \frac{\Delta_1}{2} \right)$$

$$f_{\text{max}} = \left( 1 - \cos \frac{\Delta}{2} \right) \cdot (R_1 - R_2)$$

## CURVAS VERTICAIS SIMPLES



$$g = i_1 - i_2 \quad L = R_v \cdot |g| = R_v \cdot |i_1 - i_2|$$

$$y = \frac{-g}{2L} \cdot x^2 + i_1 \cdot x$$

$$Cota(P) = \frac{-g}{2L} \cdot x^2 + i_1 \cdot x + Cota(PCV)$$

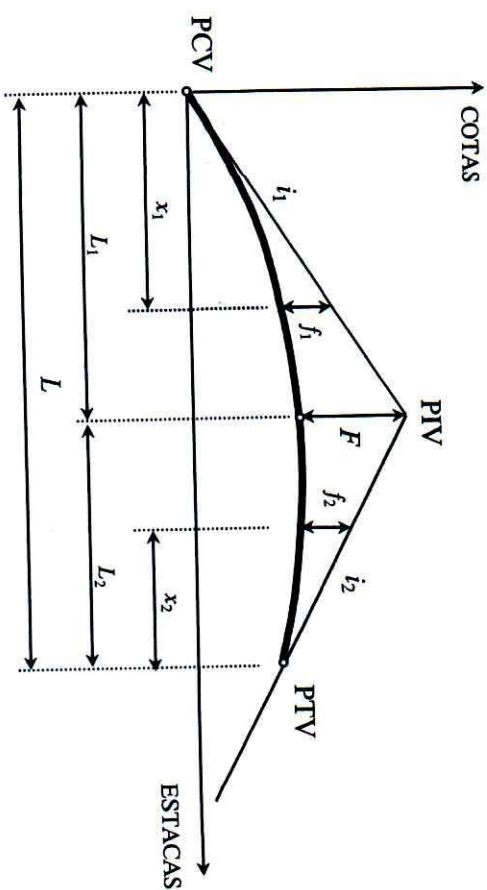
$$f = \frac{g}{2L} \cdot x^2 \quad F = \frac{g \cdot L}{8}$$

$$L_0 = \frac{i_1 \cdot L}{g} \quad y_0 = \frac{i_1^2 \cdot L}{2g}$$

$$E(PCV) = E(PIV) - [L/2] \quad E(PTV) = E(PIV) + [L/2]$$

$$Cota(PCV) = Cota(PIV) - i_1 \cdot L/2 \quad Cota(PTV) = Cota(PIV) + i_2 \cdot L/2$$

## CURVAS VERTICAIS COMPOSTAS



$$L = L_1 + L_2 \quad (L_1 \neq L_2)$$

$$F = \frac{L_1 \cdot L_2}{2L} \cdot g$$

$$f_1 = \frac{F}{L_1^2} \cdot x_1^2 \quad f_2 = \frac{F}{L_2^2} \cdot x_2^2$$

$$E(PCV) = E(PIV) - [L_1]$$

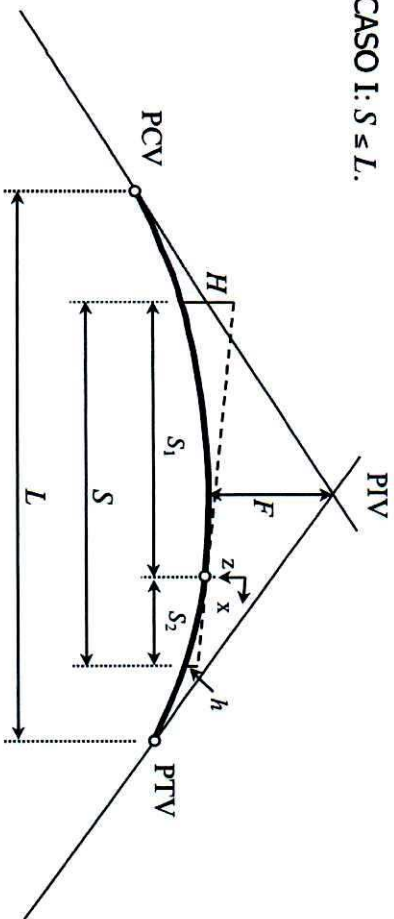
$$E(PTV) = E(PIV) + [L_2]$$

$$Cota(PCV) = Cota(PIV) - i_1 \cdot L_1$$

$$Cota(PTV) = Cota(PIV) + i_2 \cdot L_2$$

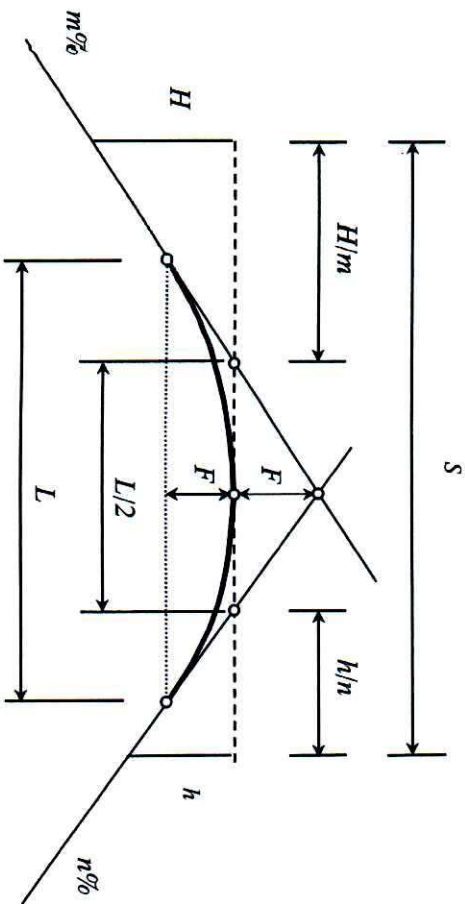
### COMPRIMENTO MÍNIMO DE CURVAS VERTICAIS CONVEXAS

CASO I:  $S \leq L$ .



$$L_{\min} = \frac{D_p^2}{412} \cdot A = K_{\min} \cdot A$$

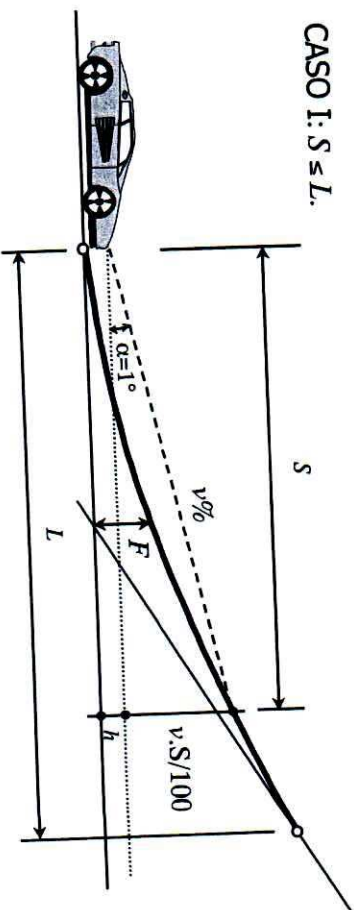
CASO II:  $S > L$ .



$$L_{\min} = 2D_p - \frac{412}{A}$$

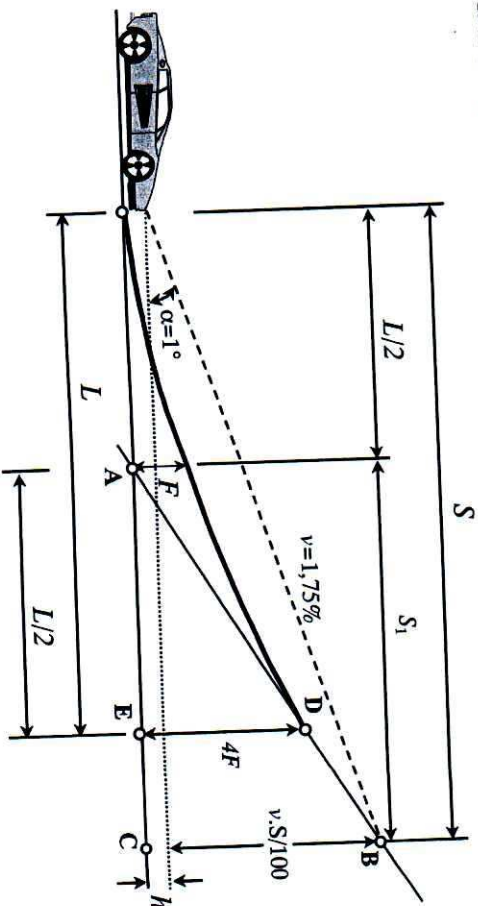
### COMPRIMENTO MÍNIMO DE CURVAS VERTICAIS CÔNCAVAS

CASO I:  $S \leq L$ .



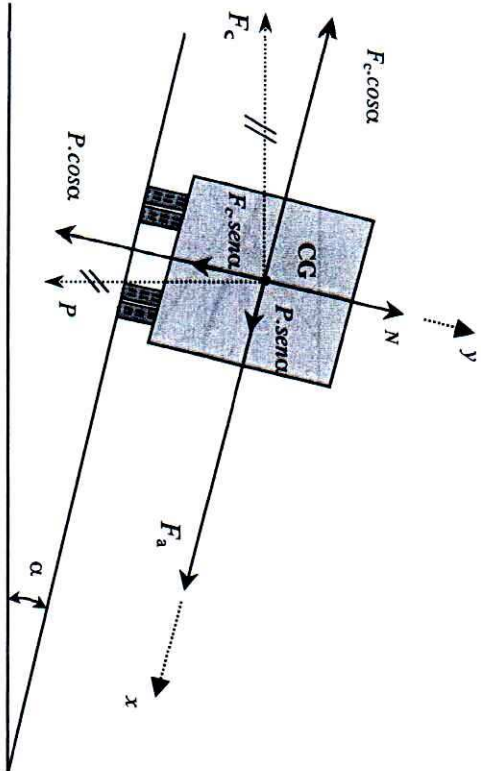
$$L_{\min} = \frac{D_p^2}{122 + 3,5 \cdot D_p} \cdot A = K_{\min} \cdot A$$

CASO II:  $S > L$ .



$$L_{\min} = 2D_p - \frac{122 + 3,5 \cdot D_p}{A}$$

### SUPERELEVÇÃO



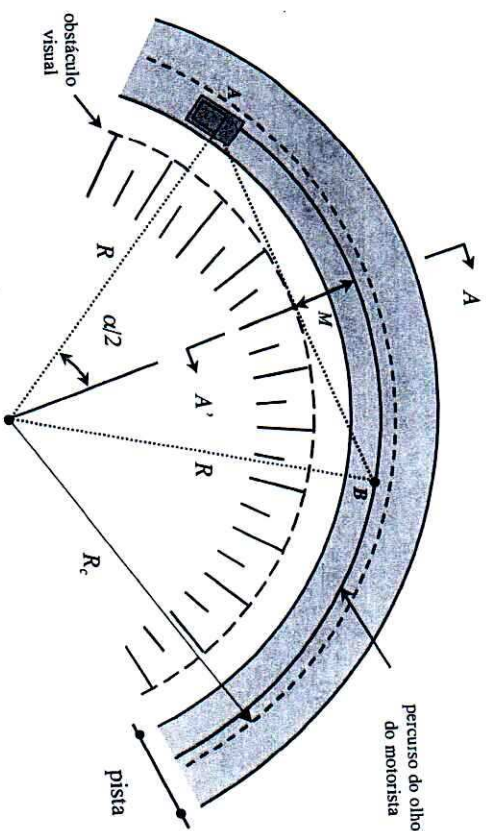
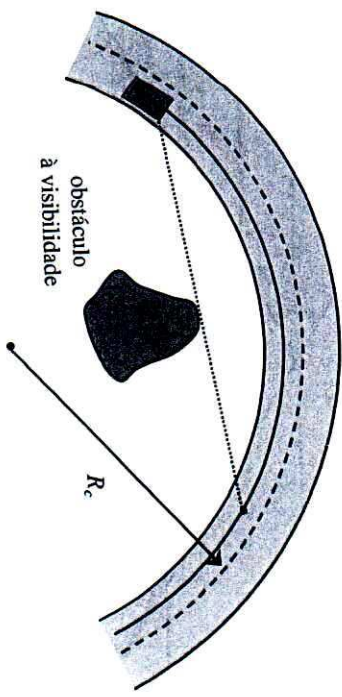
$$R_{\min} = \frac{V^2}{127 \cdot (e_{\max} + f_{\max})}$$

$$e = e_{\max} \cdot \left( \frac{2R_{\min}}{R} - \frac{R_{\min}^2}{R^2} \right)$$

### RAIOS MÍNIMOS

| SUPERELEVÇÃO<br>e <sub>lateral</sub> (%) | VELOCIDADE DE PROJETO (km/h) |    |    |     |     |     |     |     |  |  |
|--|------------------------------|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|--|--|
|  | 30                           | 40 | 50 | 60  | 70  | 80  | 90  | 100 |  |  |
| 6  | 25                           | 55 | 90 | 135 | 185 | 250 | 320 | 415 |  |  |
| 8  | 25                           | 50 | 80 | 125 | 170 | 230 | 290 | 375 |  |  |
| 10                                       | 25                           | 45 | 75 | 115 | 155 | 210 | 265 | 345 |  |  |
| 12                                       | 20                           | 45 | 70 | 105 | 145 | 195 | 245 | 315 |  |  |

### VISIBILIDADE NAS CURVAS HORIZONTAIS



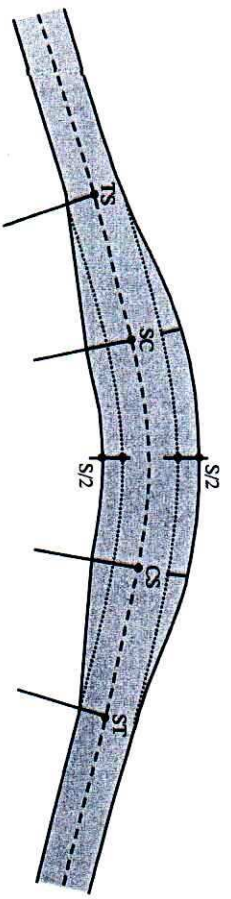
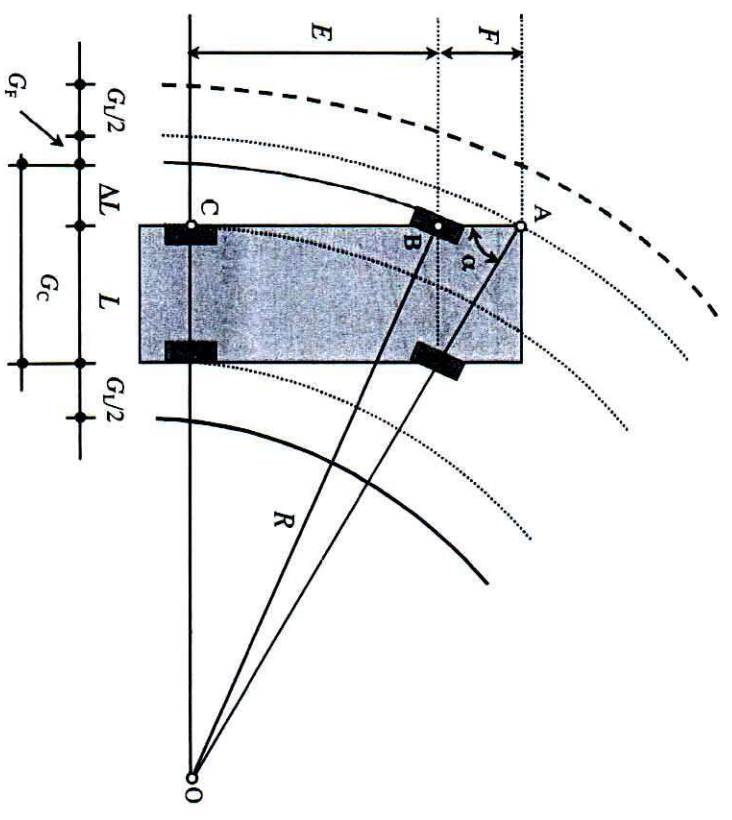
$$M = R \cdot \left[ 1 - \cos \left( \frac{28,65^\circ \cdot D}{R} \right) \right]$$

$$M = \frac{D^2}{8 \cdot R}$$





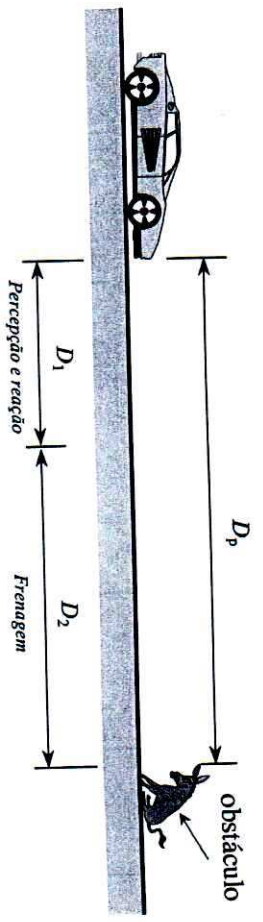
**SUPERLARGURA**



$$S = 2 \cdot \left( L + \frac{E^2}{2R} + G_L \right) + \sqrt{R^2 + F \cdot (F + 2E)} - R + \frac{V}{10\sqrt{R}} - L_B$$

$$S = n \cdot \left( R - \sqrt{R^2 - E^2} \right) + \frac{V}{10\sqrt{R}} \quad (\text{VOSHELL-PALAZZO})$$

**DISTÂNCIA DE VISIBILIDADE DE PARADA**

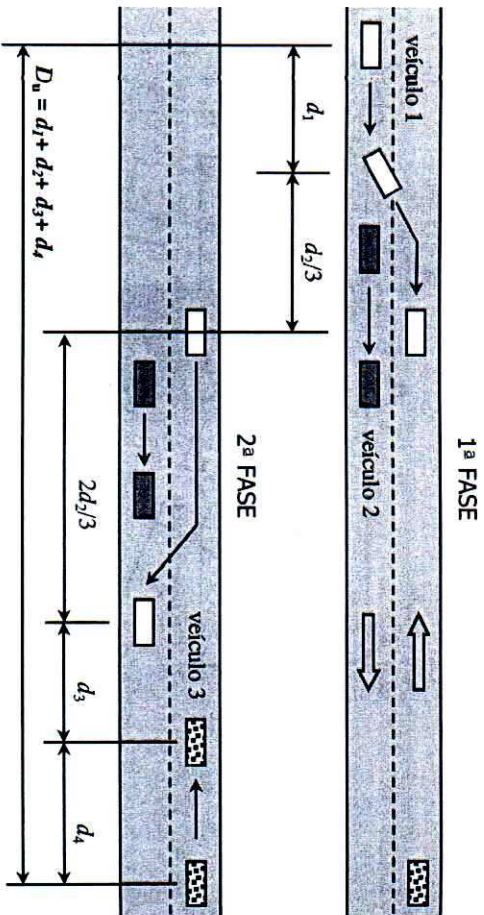


$$D_p = D_1 + D_2$$

$$D_p = 0,7 \cdot V + \frac{V^2}{255 \cdot (f + i)}$$

| Velocidade Diretriz (km/h)   | 30 | 40 | 50 | 60 | 60  | 70  | 80  | 90  | 100 | 120 |
|------------------------------|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| D <sub>p</sub> (recomendada) | 30 | 45 | 60 | 75 | 90  | 110 | 140 | 175 | 210 | 205 |
| D <sub>p</sub> (excepcional) | 30 | 45 | 65 | 85 | 110 | 140 | 175 | 210 | 210 | 310 |

## DISTÂNCIA DE VISIBILIDADE DE ULTRAPASSAGEM



$d_1$  = distância percorrida durante o tempo de percepção, reação e aceleração inicial.

$d_2$  = distância percorrida pelo veículo 1 enquanto ocupa a faixa oposta.

$d_3$  = distância de segurança entre os veículos 1 e 3, no final da manobra.

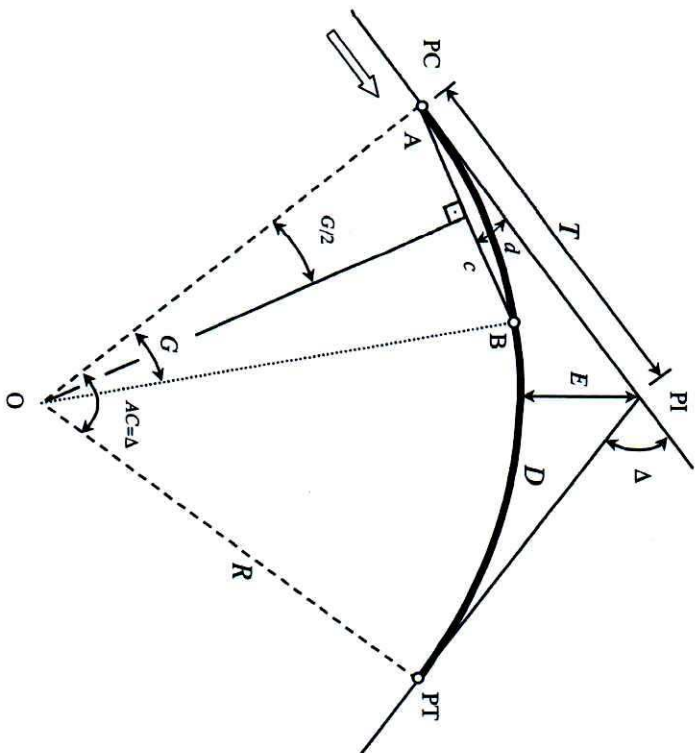
$d_4$  = distância percorrida pelo veículo 3 que trafega no sentido oposto.

| V (km/h)  | 30  | 40  | 50  | 60  | 70  | 80  | 90  | 100 |
|-----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| $D_u$ (m) | 180 | 270 | 350 | 420 | 490 | 560 | 620 | 680 |

## ANEXO II

### LISTAGENS DE PROGRAMAS CALCULADORA HP-48 G/GX

## CURVAS HORIZONTAIS CIRCULARES SIMPLES



### TELA INICIAL DO PROGRAMA:

| CURVAS CIRCULARES |       |
|-------------------|-------|
| R:                |       |
| A:                |       |
| C:                |       |
| E(PI):            |       |
| RAIO DA CURVA (m) |       |
| EDIT              | CANCL |
|                   | OK    |

### DADOS DE ENTRADA:

- R: Raio da curva, em *m*.
- A: Ângulo central, em graus.
- c: Corda para locação, em *m*.
- E(PI): Estaca do PI, no formato [INT FRAC].

### DADOS DE SAÍDA:

- T: Tangente, em *m*.
- D: Desenvolvimento da curva, em *m*.
- E: Afastamento, em *m*.
- G: Grau da curva, em graus.
- d: Deflexão para a corda c, em graus.
- dm: Deflexão por metro, em minutos.
- E(PC): Estaca do PC, no formato [INT FRAC].
- E(PT): Estaca do PT, no formato [INT FRAC].

### OBS.:

Digitar a estaca do PI no formato [INT FRAC].

Ex.: Se  $E(PI) = 120 \text{ est} + 14,50 \text{ m}$ , digitar: [120 14,50].

SPC

## LISTAGEM:

```

<< 0 0 0 0 0 0 0 7 DUPN
→ R Δ C EPI T D E G DF DM EPC EPT PC PT
<<
CLEAR DEG 2 FIX
"CURVAS CIRCULARES"
{
  {"R:" "RAIO DA CURVA (m)" 0}
  {"A:" "ÂNGULO CENTRAL (graus)" 0}
  {"C:" "CORDA PARA LOCAÇÃO (m)" 0}
  {"E(PI):" "ESTACA DO PI [INT FRAC]" 3}
}
{1 0} {} {}
INFORM DROP EVAL
{KILL "" "" "" "" CONT}
TMENU
V→ SWAP 20 * + 'EPI' STO
C' STO 'Δ' STO 'R' STO
Δ 2 / TAN R * 'T' STO
π R * Δ * 180 / →NUM 'D' STO

```

```

Δ 4 / TAN T * 'E' STO
C 180 * π / R / →NUM 'G' STO
G 2 / 'DF' STO
DF C / 60 * 'DM' STO
EPI T - 'PC' STO
PC D + 'PT' STO
PC 20 / DUP IP SWAP FP 20 * →V2 'EPC' STO
PT 20 / DUP IP SWAP FP 20 * →V2 'EPT' STO
T "T (m)" →TAG
D "D (m)" →TAG
E "E (m)" →TAG
G "G (°)" →TAG HALT
DF "d(°)" →TAG
DM "dm(min)" →TAG
EPC "E(PC)" →TAG
EPT "E(PT)" →TAG
2 MENU
>>

```

&gt;&gt;

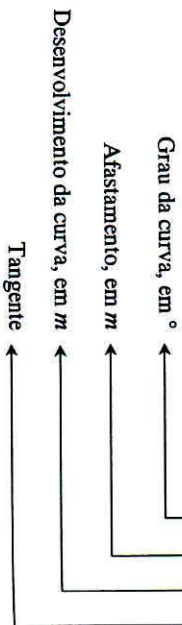
**EXEMPLO NUMÉRICO:** Projetar uma curva horizontal circular de uma

estrada, sendo dados:  $E(PI) = 180 + 4,12$ ,  $R = 171,98$  m,  $\Delta = 45,5^\circ$  e  $c = 20$  m.

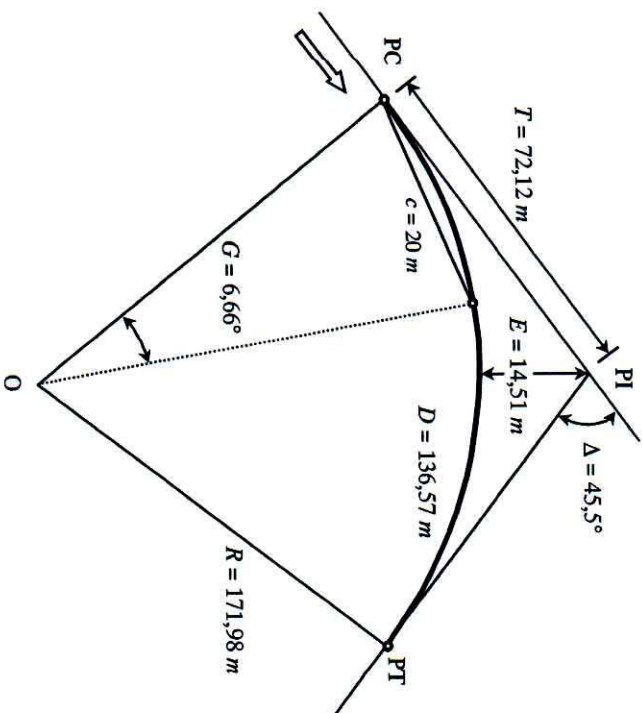
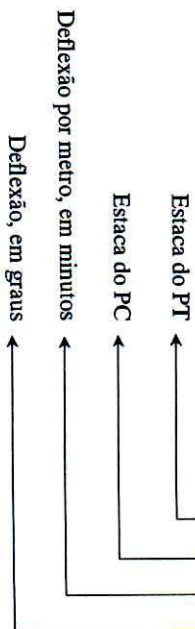
| CURVAS CIRCULARES |              |
|-------------------|--------------|
| R:                | 171,98       |
| $\Delta$ :        | 45,5         |
| C:                | 20           |
| $E(PI)$ :         | [ 180 4,12 ] |
| RAIO DA CURVA (m) |              |
| EDIT              | CANCL        |
|                   | OK           |

**RESULTADOS:**

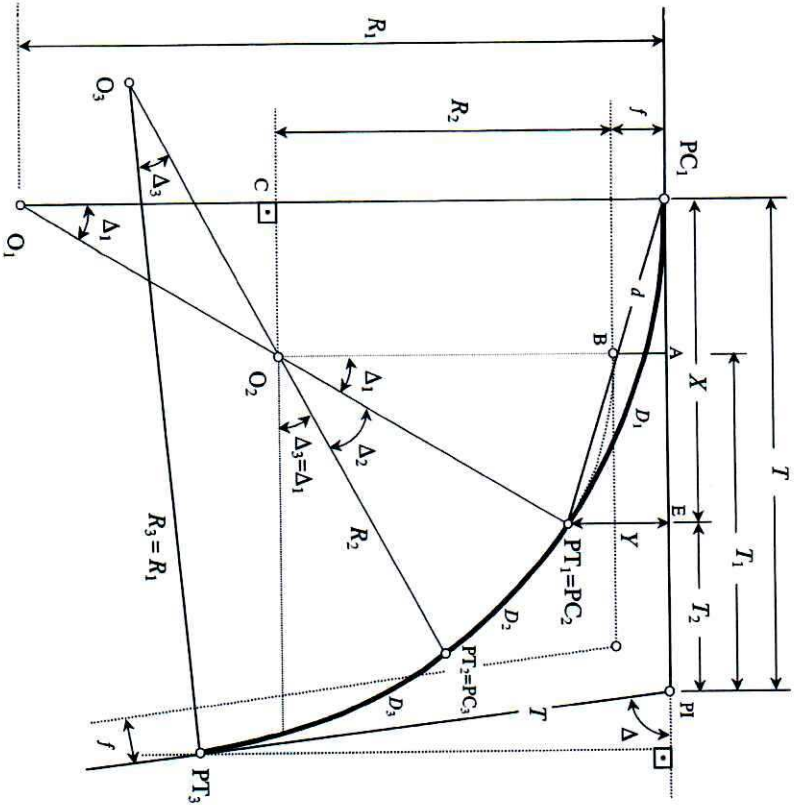
| HALT     |               |
|----------|---------------|
| { HOME } |               |
| 4:       | T (m): 72,12  |
| 3:       | D (m): 136,57 |
| 2:       | E (m): 14,51  |
| 1:       | G (°): 6,66   |
| KILL     | CONT          |



| HALT     |                         |
|----------|-------------------------|
| { HOME } |                         |
| 4:       | d (°): 3,33             |
| 3:       | dm (min): 9,99          |
| 2:       | E(PC): [ 176,00 12,00 ] |
| 1:       | E(PT): [ 183,00 8,58 ]  |
| KILL     | CONT                    |



### CURVA COMPOSTA COM 3 CENTROS (Acesso-tipo DERSA/SP)



DADOS DE ENTRADA:

- $R_1$ : Raio das curvas externas, em  $m$ .
- $R_2$ : Raio da curva interna, em  $m$ .
- $f$ : Afastamento das tangentes, em  $m$ .
- $\Delta$ : Ângulo central, em graus.

DADOS DE SAÍDA:

- $\Delta_1$ : Ângulo central das curvas externas, em graus.
- $\Delta_2$ : Ângulo central da curva interna, em graus.
- $T_1$ : Tangente da curva de raio  $(R_2 + f)$ , em  $m$ .
- $T$ : Tangente, em  $m$ .
- $d$ : Corda auxiliar, em  $m$ .
- $X, Y$ : Coordenadas do  $PT_1$ , em relação ao  $PC_1$ , em  $m$ .
- $f_{max}$ : Afastamento máximo das tangentes, em  $m$ .

TELA INICIAL DO PROGRAMA:

|                              |                   |
|------------------------------|-------------------|
| R1:                          | ACESSO-TIPO DERSA |
| R2:                          |                   |
| F:                           |                   |
| Δ:                           |                   |
| RAIO DAS CURVAS EXTERNAS (m) |                   |
| EDIT                         | CANCL             |
|                              | OK                |

## LISTAGEM:

&lt;&lt; 0 0 0 0 0 0 6 DUPN

→ R1 R2 Δ Δ1 Δ2 F T T1 D X Y FMAX

&lt;&lt;

CLEAR

DEG

"ACCESSO-TIPO DERSA"

{

{ "R1:" "RAIO DAS CURVAS EXTERNAS (m)" 0 }

{ "R2:" "RAIO DA CURVA INTERNA (m)" 0 }

{ "F:" "AFASTAMENTO DAS TANGENTES (m)" 0 }

{ "Δ:" "ÂNGULO CENTRAL (°)" 0 }

}

{ 1 0 } { }

INFORM DROP EVAL

{ KILL " " " " " " CONT } TMENU

'Δ' STO 'F' STO 'R2' STO 'R1' STO

F R2 + R1 - R2 R1 - / ACOS 'Δ1' STO

Δ Δ1 2 \* - 'Δ2' STO

Δ 2 / TAN R2 F + \* 'T1' STO

R1 R2 F + - Δ1 TAN \* T1 + 'T' STO

Δ1 SIN Δ1 2 / COS / R1 \* 'D' STO

Δ1 SIN R1 \* 'X' STO

Δ1 2 / TAN Δ1 SIN \* R1 \* 'Y' STO

R2 R1 - Δ 2 / COS 1 - \* 'FMAX' STO

Δ1 "Δ1=Δ3 (°)" →TAG

Δ2 "Δ2 (°)" →TAG

T1 "T1 (m)" →TAG

T "T (m)" →TAG

HALT

D "d (m)" →TAG

X "X (m)" →TAG

Y "Y (m)" →TAG

FMAX "Fmax (m)" →TAG

2 MENU

&gt;&gt;

&gt;&gt;

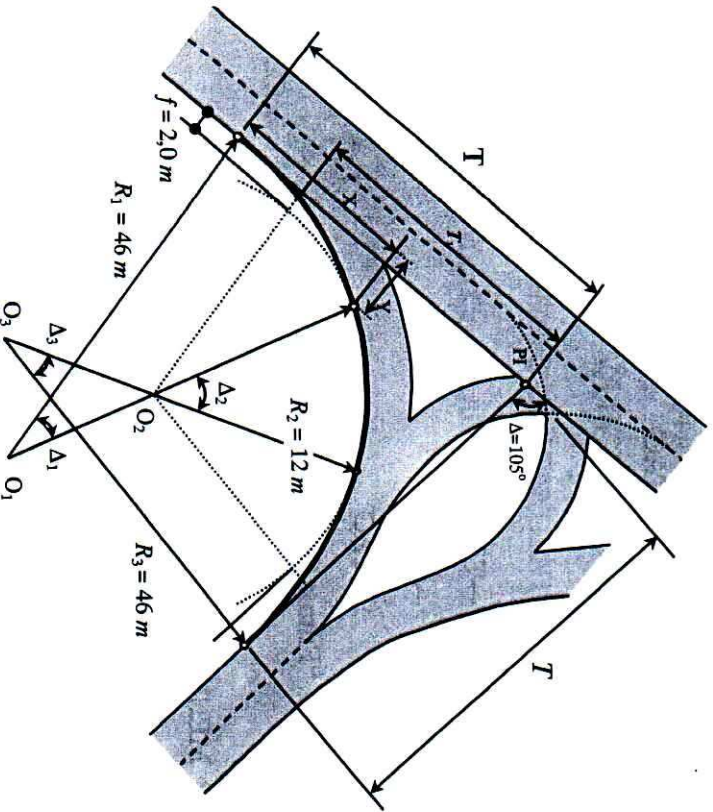
**EXEMPLO NUMÉRICO:** Projetar a curva composta com 3 centros da figura abaixo.

**ACESSO-TIPO DERSA**

R1: 46  
 R2: 12  
 F: 2  
 A: 105

**RADIO DAS CURVAS EXTERNAS (m)**

EDIT    CANCEL    OK



**RESULTADOS:**

HALT

{ HOME }

4:  $\Delta 1 = \Delta 3$  (°): 19,75  
 3:  $\Delta 2$  (°): 65,50  
 2: T1 (m): 18,25  
 1: T (m): 29,73

KILL    CONT

Tangente, em m →  
 Tangente da curva de raio  $R_2 + f$ , em m →  
 Ângulo central da curva interna, em graus →  
 Ângulo central das curvas externas, em graus →

{ HOME }

4: d (m): 15,78  
 3: X (m): 15,54  
 2: Y (m): 2,71  
 1: Fmax (m): 13,30

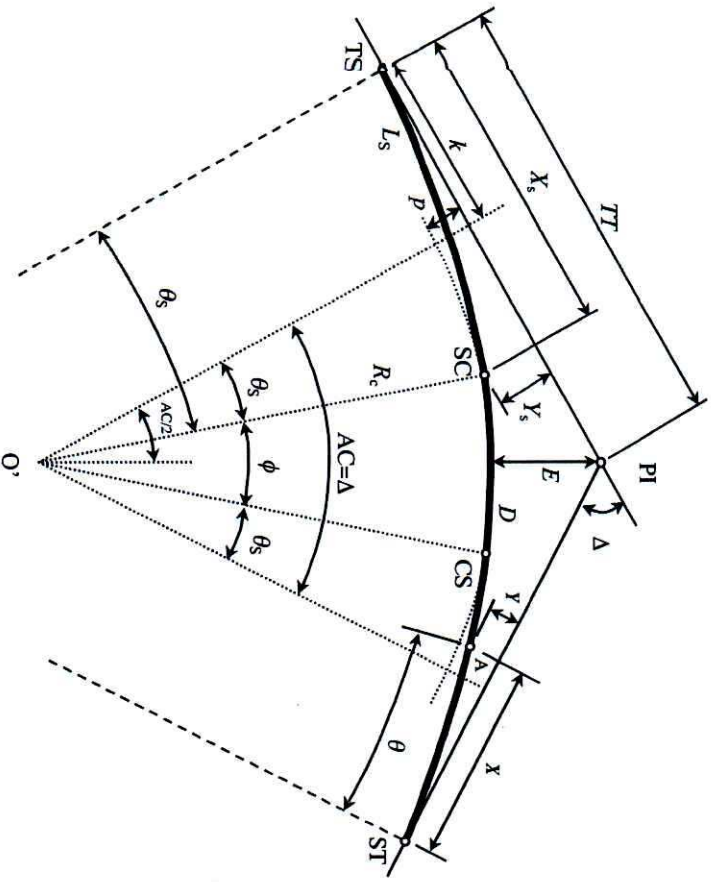
KILL    CONT

Afastamento máximo das tangentes, em m →  
 Ordenada do ponto  $PT_1$ , em relação ao  $PC_1$  →  
 Abscissa do ponto  $PT_1$ , em relação ao  $PC_1$  →  
 Corda auxiliar, em m →



## CURVAS HORIZONTAIS CIRCULARES COM TRANSIÇÃO

(Espirais Simétricas)



### DADOS DE ENTRADA:

- $R_c$ : Raio da curva, em  $m$ .
- $\Delta$ : Ângulo central, em graus.
- $V$ : Velocidade de projeto, em  $km/h$ .
- $E(PI)$ : Estaca do PI, no formato [INT FRAC].

### DADOS DE SAÍDA:

- $L_{s\ min}$ : Valor mínimo de  $L_s$ .
- $L_{s\ max}$ : Valor máximo de  $L_s$ .
- $\theta_s$ : Ângulo de transição, em graus.
- $\phi$ : Ângulo central do trecho circular.
- $i_s$ : Deflexão para locar o SC.
- $i_s - i'_s$ : Deflexão para locar o SC.
- $j_s$ : Deflexão para locar o SC.
- $X_s$ : Abscissa dos pontos SC e CS.
- $Y_s$ : Ordenada dos pontos SC e CS.
- $k$ : Abscissa do centro  $O'$ .
- $p$ : Afastamento da curva circular.
- $TT$ : Tangente total.
- $D$ : Desenvolvimento do trecho circular.
- $E$ : Distância do PI à curva circular.
- $C$ : Distância do TS ao SC.
- $E(TS)$ : Estaca do TS.
- $E(SC)$ : Estaca do SC.
- $E(SC)$ : Estaca do SC.
- $E(ST)$ : Estaca do ST.

### TELA INICIAL DO PROGRAMA:

|                            |                      |
|----------------------------|----------------------|
| <b>CURVAS DE TRANSIÇÃO</b> |                      |
| R:                         | <input type="text"/> |
| $\Delta$ :                 | <input type="text"/> |
| V:                         | <input type="text"/> |
| $E(PI)$ :                  | <input type="text"/> |
| RATO DA CURVA (m)          |                      |
| EDIT                       | <input type="text"/> |
| CANCL                      | <input type="text"/> |
| OK                         | <input type="text"/> |

**LISTAGEM:**

```

<< 0 0 0 0 0 0 5 DUPN 5 DUPN 10 DUPN
→ TS SC CS ST ETS ESC ECS EST D φ TT P K
XS YS 0S IS ISMAX ISMIN EPI Δ R V IS C JS E
<<
CLEAR
RAD
"CURVAS DE TRANSIÇÃO"
{
  {"R:" "RAIO DO TRECHO CIRCULAR (m)" 0}
  {"Δ:" "ÂNGULO CENTRAL (graus)" 0}
  {"V:" "VELOCIDADE DE PROJETO (km/h)" 0}
  {"E(P1)":"ESTACA DO PI [INT FRAC]" 3}
}
{1 0} {} {}
INFORM DROP EVAL
{KILL "" "" "" "" "" CONT} TMENTU

```

```

V→ SWAP 20 * + 'EPI' STO
'V' STO 'Δ' STO 'R' STO
V 3 ^ R / 0,036 * 'ISMIN' STO
R Δ D→R * 'ISMAX' STO
ISMIN 'IS mínimo' →TAG
ISMAX 'IS máximo' →TAG 2 FIX
"ADOTE UM VALOR PARA Is (m):"
PROMPT 'IS' STO
IS 2 / R / '0S' STO
0S 4 ^ 216 / 0S 2 ^ 10 / - 1 + IS *
'XS' STO
0S 3 / 0S 3 ^ 42 / - IS * 'YS' STO
0S SIN R * NEG XS + 'K' STO
0S COS NEG 1 + R * NEG YS + 'P' STO
Δ 0S R→D 2 * - 'φ' STO
φ D→R R * 'D' STO
DEC

```

```

A 2 / TAN R P + * K + 'TT' STO
A 2 / COS R P + / INV R - 'E' STO
YS XS / ATAN 'IS' STO
ØS R→D IS - 'JS' STO
IS COS XS / INV 'C' STO

EPI TT - 'TS' STO
TS IS + 'SC' STO
SC D + 'CS' STO
CS IS + 'ST' STO

TS 20 / DUP IP SWAP FP 20 * →V2 'ETS' STO
SC 20 / DUP IP SWAP FP 20 * →V2 'ESC' STO
CS 20 / DUP IP SWAP FP 20 * →V2 'ECS' STO
ST 20 / DUP IP SWAP FP 20 * →V2 'EST' STO
6 FIX

ØS "ØS (rad)" →TAG
φ "φ (°)" →TAG
IS "is (°)" →TAG
JS "js (°)" →TAG HALT 2 FIX

```

```

XS "Xs (m)" →TAG
YS "Ys (m)" →TAG
K "k (m)" →TAG
P "p (m)" →TAG HALT

```

```

TT "TT (m)" →TAG
D "D (m)" →TAG
E "E (m)" →TAG
C "C (m)" →TAG HALT

```

```

ETS "E(TS)" →TAG
ESC "E(SC)" →TAG
ECS "E(CS)" →TAG
EST "E(ST)" →TAG 2 MENU
>>

```

OBS.:

1) Digitar a estaca do PI no formato [ INT FRAC ].

Ex.: Se E(PI) = 120 est + 14,50 m, digitar: [120 14,50].

SPC

**EXEMPLO NUMÉRICO:** Projetar uma curva de transição de uma estrada,

sendo dados:  $E(P1) = 228 + 17,00$ ,  $R = 500\text{ m}$ ,  $\Delta = 35^\circ$  e  $V_p = 100\text{ km/h}$ .

| CURVAS DE TRANSIÇÃO         |               |
|-----------------------------|---------------|
| R:                          | 500           |
| $\Delta$ :                  | 35            |
| V:                          | 100           |
| E(P1):                      | [ 228 17,00 ] |
| RAIO DO TRECHO CIRCULAR (m) |               |
| EDIT                        | CANCEL OK     |

**RESULTADOS:**

| ADOTE UM VALOR P/LS: |                  |
|----------------------|------------------|
| 4:                   |                  |
| 3:                   |                  |
| 2:                   | LSmínimo: 72,00  |
| 1:                   | LSmáximo: 305,43 |
| KILL                 | CONT             |

Para este exemplo, adotaremos  $L_s = 120\text{ m}$ .

Digitar 120

Pressionar **CONT**

| HALT     |                            |
|----------|----------------------------|
| { HOME } |                            |
| 4:       | $\theta_s$ (rad): 0,120000 |
| 3:       | $\phi$ (°): 21,249013      |
| 2:       | $i_s$ (°): 2,291551        |
| 1:       | $j_s$ (°): 4,583943        |
| KILL     | CONT                       |

Deflexão para localizar o ponto SC →  $\theta_s - i_s$

Ângulo central do trecho circular, em graus →

Ângulo da transição, em radianos →

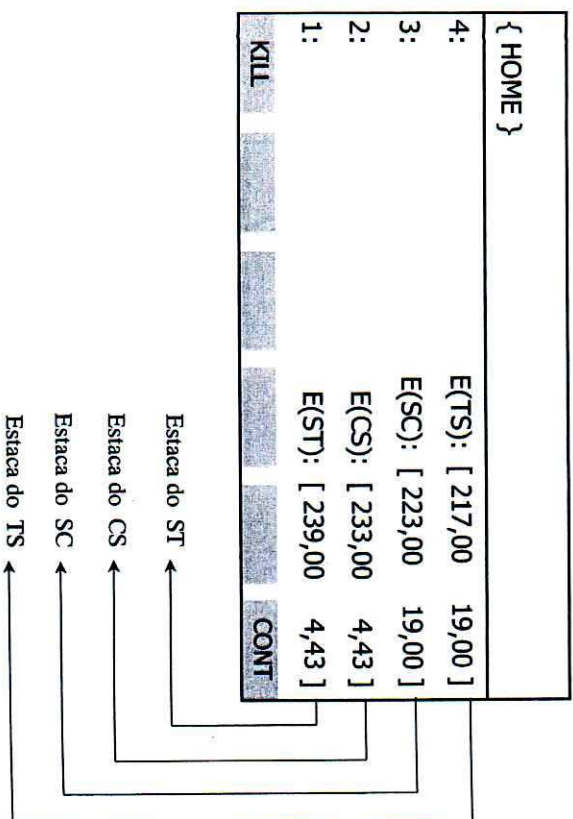
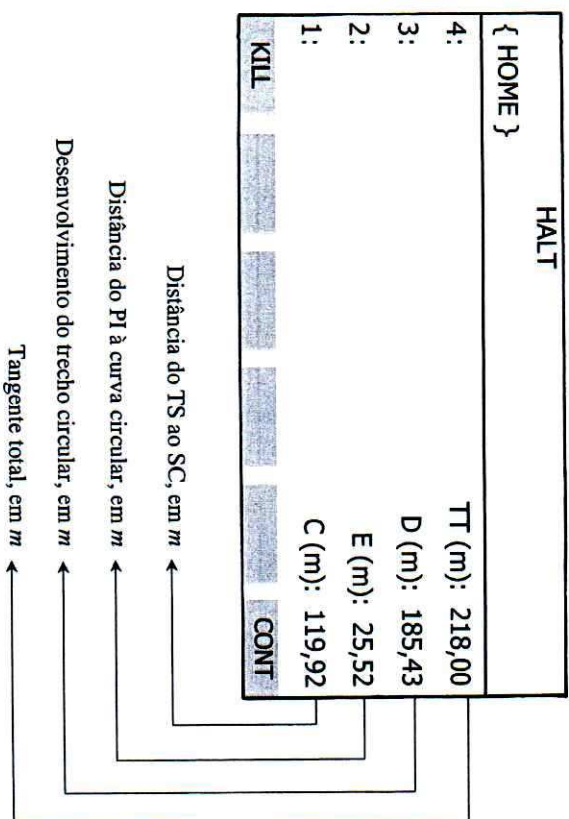
| HALT     |                   |
|----------|-------------------|
| { HOME } |                   |
| 4:       | $X_s$ (m): 119,83 |
| 3:       | $Y_s$ (m): 4,80   |
| 2:       | $K$ (m): 59,97    |
| 1:       | $p$ (m): 1,20     |
| KILL     | CONT              |

Afastamento da curva circular, em  $m$  →

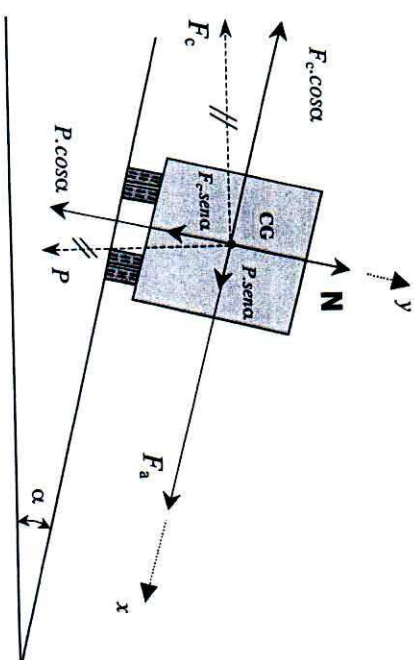
Abscissa do centro  $O'$ , em  $m$  →

Ordenada dos pontos SC e CS, em  $m$  →

Abscissa dos pontos SC e CS, em  $m$  →



## SUPERELEVÇÃO



### DADOS DE ENTRADA:

- $V$ : Velocidade de Projeto, em  $km/h$ .
- $R$ : Raio da curva, em  $m$ .
- $f_T$ : Coeficiente de atrito transversal.
- $e_{máx}$ : Super elevação máxima, em %.

### DADOS DE SAÍDA:

- $R_{mín}$ : Raio mínimo da curva, em  $m$ .
- $e$ : Super elevação, em %.

**TELA INICIAL DO PROGRAMA:**

|                              |       |
|------------------------------|-------|
| SUPERELEVÇÃO                 |       |
| V:                           |       |
| R:                           |       |
| EMAX:                        |       |
| FT:                          |       |
| VELOCIDADE DE PROJETO (km/h) |       |
| EDIT                         |       |
|                              | CANCL |
|                              | OK    |

**LISTAGEM:**

```
<< 0 0 0 0 0 0
-> V R EMAX FT RMIN E
<<
CLEAR
"SUPERELEVÇÃO"
{
  {"V:" "VELOCIDADE DE PROJETO (km/h)" 0}
  {"R:" "RAIO DA CURVA (m)" 0}
```

```
{"EMAX:" "SUPERELEVÇÃO MÁXIMA (%)" 0}
{"FT:" "ATRILO TRANSVERSAL" 0}
} {1 0} {} {}
INFORM
DROP
EVAL
'FT' STO
'EMAX' STO
'R' STO
'V' STO
EMAX 100 / FT + 127 * V SQ / INV 'RMIN' STO
RMIN 2 * R / RMIN R / SQ - EMAX * 'E' STO
RMIN "Rmín (m)" ->TAG
E "e (%)" ->TAG
>>
```

**EXEMPLO NUMÉRICO:** Calcular a superelevação a ser adotada numa

curva de uma rodovia, com raio  $R = 900\text{ m}$ . Dados:  $V = 90\text{ km/h}$ ,

$e_{\text{máx}} = 10\%$  e  $f_r = 0,14$ .

|                      |       |
|----------------------|-------|
| <b>SUPERELEVAÇÃO</b> |       |
| V: 90                |       |
| R: 900               |       |
| EMAX: 10             |       |
| FT: 0,14             |       |
| VELOCIDADE (km/h)    |       |
| EDIT                 | OK    |
|                      | CANCL |

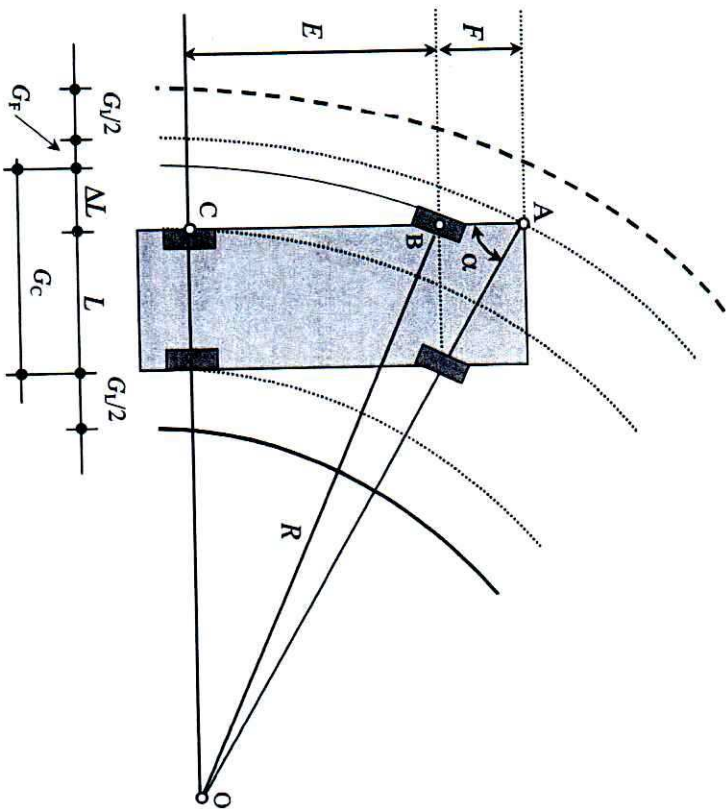
**RESULTADOS:**

|          |                  |
|----------|------------------|
| { HOME } |                  |
| 4:       |                  |
| 3:       |                  |
| 2:       | Rmin (m): 265,75 |
| 1:       | e (%): 5,03      |
| KILL     |                  |
|          | CONT             |

Superelevação, em %

Raio mínimo de curvatura, em m

**SUPERLARGURA**



**TELA INICIAL DO PROGRAMA:**

|                     |       |
|---------------------|-------|
| <b>SUPERLARGURA</b> |       |
| V:                  | R:    |
| L:                  | F:    |
| E:                  | GL:   |
| LB:                 |       |
| VELOCIDADE (km/h)   |       |
| EDIT                | OK    |
|                     | CANCL |

## DADOS DE ENTRADA:

- V: Velocidade de Projeto, em km/h.  
 R: Raio da curva, em m.  
 L: Largura física do veículo, em m.  
 F: Balanço direito do veículo, em m.  
 E: Distância entre eixos, em m.  
 $G_L$ : Folga lateral do veículo, em m.  
 $L_b$ : Largura básica da pista em tangente, em m.

## DADOS DE SAÍDA:

- $G_c$ : Gabarito estático do veículo em curva, em m.  
 $G_f$ : Acréscimo devido ao balanço direito, em m.  
 $F_d$ : Folga dinâmica, em m.  
 S: Superlargura, em m.

## LISTAGEM:

```
<< 0 0 0 0 0 5 DUPN
→ V R L F E GL LB GC GF FD S
<<
CLEAR "SUPERLARGURA"
```

```
{ {"V:" "VELOCIDADE (km/h)" 0}
{"R:" "RAIO DA CURVA (m)" 0}
{"L:" "LARGURA DO VEÍCULO (CO=SR=2,6 m)" 0}
{"F:" "BALANÇO DIREITO (CO=SR=1,2 m)" 0}
{"E:" "DIST ENTRE EIXOS (CO=6,1 / SR=10 m)" 0}
{"GL:" "FOLGA LATERAL (0,9 P / LB=7-7,2m)" 0}
{"LB:" "LARGURA DA PISTA EM TANGENTE (m)" 0}
} {2 0} {} {}

INFORM DROP EVAL

'LB' STO 'GL' STO 'E' STO 'F' STO
'L' STO 'R' STO 'V' STO
E SQ 2 / R / L + 'GC' STO
E 2 * F + F * R SQ + √ R - 'GF' STO
V 10 / R √ / 'FD' STO
GC GL + 2 * GF + FD + LB - 'S' STO
GC "GC (m)" →TAG
GF "GF (m)" →TAG
FD "FD (m)" →TAG
S "S (m)" →TAG 2 MENU
>> >>
```



**EXEMPLO NUMÉRICO:** Calcular a superlargura necessária numa curva de raio  $R = 300\text{ m}$ . Dados:  $L_b = 7,20\text{ m}$  e  $V = 90\text{ km/h}$ .

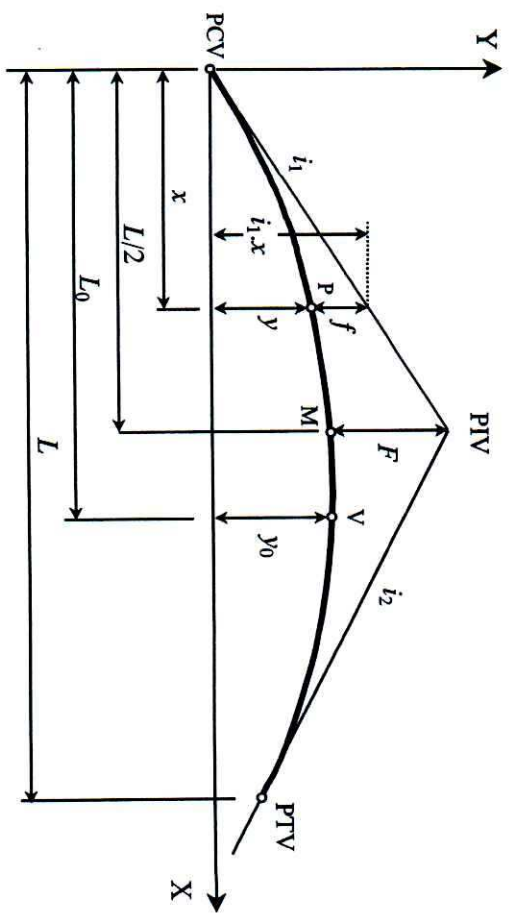
Veículo de Projeto: CO  $\left\{ \begin{array}{l} L = 2,60\text{ m} \text{ (largura física do veículo)} \\ E = 6,10\text{ m} \text{ (distância entre eixos)} \\ F = 1,20\text{ m} \text{ (balanço direito do veículo)} \end{array} \right.$

|                     |         |
|---------------------|---------|
| <b>SUPERLARGURA</b> |         |
| V: 90               | R: 300  |
| L: 2,6              | F: 1,2  |
| E: 6,1              | GL: 0,9 |
| LB: 7,2             |         |
| VELOCIDADE (km/h)   |         |
| EDIT                | CANCL   |
|                     | OK      |

|          |              |
|----------|--------------|
| { HOME } |              |
| 4:       | GC (m): 2,66 |
| 3:       | GF (m): 0,03 |
| 2:       | FD (m): 0,52 |
| 1:       | S (m): 0,47  |
| KILL     | CONT         |

Superlargura, em m  
Folga dinâmica, em m  
Acréscimo devido ao balanço dianteiro, em m  
Gabarito estático do veículo em curva, em m

**CURVAS VERTICAIS**  
(Simétricas)



**DADOS DE ENTRADA:**

- $i_1$ : Rampa, em %.
- $i_2$ : Contra-rampa, em %.
- L: Comprimento da curva vertical, em m.
- E(PIV): Estaca do PIV, no formato [INT FRAC].
- Cota(PIV): Cota do PIV, em m.

**DADOS DE SAÍDA:**

E(PCV): Estaca do PCV [INT FRAC].  
 E(PTV): Estaca do PTV [INT FRAC].  
 E(V): Estaca do Vértice V [INT FRAC].  
 Cota(PCV): Cota do PCV, em *m*.  
 Cota(PTV): Cota do PTV, em *m*.  
 Cota(V): Cota do Vértice V, em *m*.  
 $L_0$ : Abscissa do vértice V em relação ao PCV, em *m*.  
 $y_0$ : Ordenada do vértice V em relação ao PCV, em *m*.  
 E(P): Estaca de um ponto genérico P.  
 Cota(P): Cota do greide de projeto, em *m*.  
 $f$ : Ordenadas da parábola, em relação à primeira rampa (*m*).

**TELA INICIAL DO PROGRAMA:**

| CURVAS VERTICAIS |            |
|------------------|------------|
| i1:              | i2:        |
| L:               | COTA(PIV): |
| E(PIV):          |            |
| RAMPAS (%)       |            |
| EDIT             | CANCL      |
|                  | OK         |

**LISTAGEM:**

```
<< 0 0 0 0 0 5 DUPN 5 DUPN 8 DUPN
    → I1 I2 L PIV PCV PTV EPCV EPTV V EV F G
      CPIV CPCV CPTV CV L0 Y0 D X PP EPP COTA N
<< CLEAR "CURVAS VERTICAIS"
{
  {"1:" "RAMPAS (%)"} 0}
  {"2:" "CONTRA-RAMPAS (%)"} 0}
  {"L:" "COMPRIMENTO DA CURVA VERTICAL (m)"} 0}
  {"COTA(PIV):" "COTA DO PIV (m)"} 0}
  {"E(PIV):" "ESTACA DO PIV [INT FRAC]"} 3}
} {2 0} {} {} INFORM DROP EVAL
{KILL "" "" "" "" "" CONT} TMENU
V→ SWAP 20 * + 'PIV' STO
'CPIV' STO 'L' STO 100 / 'I2' STO 100 / 'I1' STO
I1 I2 - 'G' STO
I1 L * G / 'L0' STO
L0 I1 * 2 / 'Y0' STO
```

```

PIV L 2 / - 'PCV' STO
PIV L 2 / + 'PTV' STO
PCV L0 + 'V' STO
PCV 20 / DUP IP SWAP FP 20 * →V2 'EPCV' STO
PTV 20 / DUP IP SWAP FP 20 * →V2 'EPTV' STO
V 20 / DUP IP SWAP FP 20 * →V2 'EV' STO
CPIV I1 L * 2 / - 'CPCV' STO
CPIV I2 L * 2 / + 'CPTV' STO
CPCV Y0 + 'CV' STO
EPCV "E(PCV)" →TAG
EPTV "E(PTV)" →TAG
CPCV "Cota(PCV)" →TAG
CPTV "Cota(PTV)" →TAG
HALT

L0 "L0" →TAG
Y0 "Y0" →TAG
EV "E(V)" →TAG
CV "Cota(V)" →TAG HALT
CLEAR 2) FIX

```

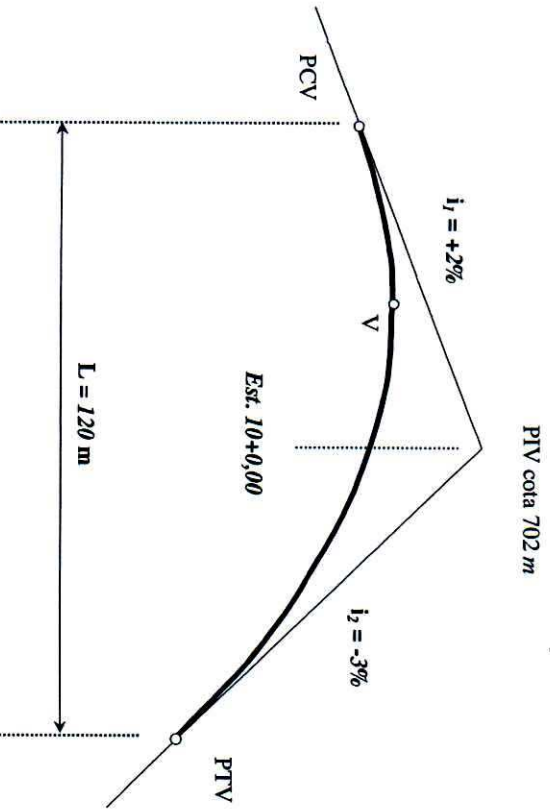
```

PCV 'PP' STO
"DISTÂNCIA = ?" PROMPT 'D' STO
D 'X' STO
L D / 'N' STO
1 N START
D 'PP' STO+
PP 20 / DUP IP SWAP FP 20 * →V2 'EPP' STO
G NEG 2 L * / X SQ * I1 X * + CPCV +
'COTA' STO
G 2 / L / X SQ * 'F' STO
CLEAR
EPP "E(P)" →TAG
COTA "Cota(P)" →TAG
F "f" →TAG HALT
D 'X' STO+
NEXT
2 MENU
>>
>>

```

**EXEMPLO NUMÉRICO:** Projetar a curva vertical da figura abaixo:

| CURVAS VERTICAIS |                |
|------------------|----------------|
| i1: 2            | i2: -3         |
| L: 120           | COTA(PIV): 702 |
| E(PIV): [10 0]   |                |
| RAMPA (%)        |                |
| EDIT             | CANCL          |
|                  | OK             |



**RESULTADOS:**

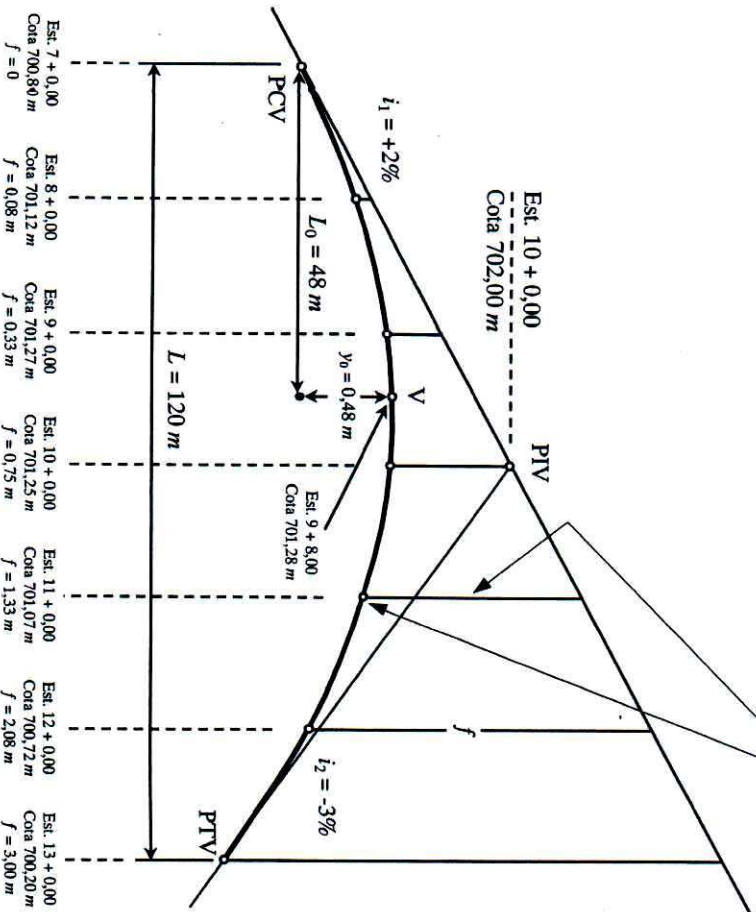
| HALT     |                        |
|----------|------------------------|
| { HOME } |                        |
| 4:       | E(PCV): [ 7,00 0,00 ]  |
| 3:       | E(PTV): [ 13,00 0,00 ] |
| 2:       | Cota(PCV): 700,80      |
| 1:       | Cota(PTV): 700,20      |
| KILL     | CONT                   |

| HALT     |                        |
|----------|------------------------|
| { HOME } |                        |
| 4:       | L <sub>0</sub> : 48,00 |
| 3:       | y <sub>0</sub> : 0,48  |
| 2:       | E(V): [ 9,00 8,00 ]    |
| 1:       | Cota(V): 701,28        |
| KILL     | CONT                   |

Distância entre pontos da curva para cálculo de  $f$ : 20 m (pressione **CONT** várias vezes para calcular estaca por estaca).

| HALT     |                     |
|----------|---------------------|
| { HOME } |                     |
| 4:       | E(P): [ 8,00 0,00 ] |
| 3:       | Cota(P): 701,12     |
| 2:       | f: 0,08             |
| 1:       |                     |
| KILL     | CONT                |

|          |                   |
|----------|-------------------|
| { HOME } | HALT              |
| 4:       | E: [ 11,00 0,00 ] |
| 2:       | Cota: 701,07      |
| 1:       | f: 1,33           |
| KILL     | CONT              |



# ANEXO III

## RESUMO DOS CRITÉRIOS BÁSICOS PARA O PROJETO GEOMÉTRICO DE RODOVIAS RURAIS, AGRUPADOS POR CLASSE DE PROJETO

## RODOVIAS CLASSE 0 - VIAS EXPRESSAS

| CARACTERÍSTICAS   | RELEVO      |             |             |
|---|-------------|-------------|-------------|
|   | PLANO       | ONDULADO    | MONTANHOSO  |
| Velocidade diretriz                                     | 120 km/h    | 100 km/h    | 80 km/h     |
| Distância mínima de visibilidade de parada:             |             |             |             |
| • excepcional (m)                                       | 310         | 210         | 140         |
| • recomendada (m)                                       | 205         | 155         | 110         |
| Raio mínimo de curva horiz., $e = 10\%$ (m)             | 540         | 345         | 210         |
| Rampa máxima  | 3%          | 4%          | 5%          |
| Valor mínimo de K para curvas verticais convexas:       |             |             |             |
| • excepcional   | 233         | 107         | 48          |
| • recomendado   | 102         | 58          | 29          |
| Valor mínimo de K para curvas verticais côncavas:       |             |             |             |
| • excepcional   | 80          | 52          | 32          |
| • recomendado   | 50          | 36          | 24          |
| Largura da faixa de rolamento (m)                       | 3,60        | 3,60        | 3,60        |
| Largura do acostamento externo (m)                      | 3,0         | 3,0         | 3,0         |
| Largura do acostamento interno (m):                     |             |             |             |
| • pistas de 2 faixas                                    | 1,20 - 0,60 | 1,00 - 0,60 | 0,60 - 0,50 |
| • pistas de 3 faixas*                                   | 3,00 - 2,50 | 2,50 - 2,00 | 2,50 - 2,00 |
| • pistas de 4 faixas                                    | 3,00        | 3,00 - 2,50 | 3,00 - 2,50 |
| Gabarito mínimo vertical (m)                            | 5,5         | 5,5         | 5,5         |
| Afastamento lateral mínimo da borda do acostamento (m): |             |             |             |
| • obstáculos contínuos                                  | 0,5         | 0,5         | 0,5         |
| • obstáculos isolados                                   | 1,5         | 1,5         | 1,5         |
| Largura do canteiro central (m)                         |             |             |             |
| • seção restrita**                                      | 3 - 7       | 3 - 7       | 3 - 7       |
| • valor normal  | 6 - 7       | 6 - 7       | 6 - 7       |
| • excepcional   | 10 - 18     | 10 - 18     | 10 - 18     |

\* Quando for dispensável o acostamento interno total, utilizar os valores para pistas de 2 faixas.

\*\* Conforme a largura dos acostamentos internos.

Fonte: DNER

## RODOVIAS CLASSE I

| CARACTERÍSTICAS  | RELEVO      |             |             |
|--|-------------|-------------|-------------|
|  | PLANO       | ONDULADO    | MONTANHOSO  |
| Velocidade diretriz  | 100 km/h    | 80 km/h     | 60 km/h     |
| Distância mínima de visibilidade de parada:                        |             |             |             |
| • excepcional (m)  | 210         | 140         | 85          |
| • recomendada (m)  | 155         | 110         | 75          |
| Distância mínima de visibilidade de ultrapassagem (Classe I-B) (m) | 680         | 560         | 420         |
| Raio mínimo de curva horiz., $e = 10\%$ (m)                        | 345         | 210         | 115         |
| Rampa máxima   | 3%          | 4,5%        | 6%          |
| Valor mínimo de K para curvas verticais convexas:                  |             |             |             |
| • excepcional  | 107         | 48          | 18          |
| • recomendado  | 58          | 29          | 14          |
| Valor mínimo de K para curvas verticais côncavas:                  |             |             |             |
| • excepcional  | 52          | 32          | 17          |
| • recomendado  | 36          | 24          | 15          |
| Largura da faixa de rolamento (m)                                  | 3,60        | 3,60        | 3,50        |
| Largura do acostamento externo (m)                                 | 3,0         | 2,5         | 2,5         |
| Largura do acostamento interno (Classe I-A)                        |             |             |             |
| • pistas de 2 faixas (m)   | 1,20 - 0,60 | 1,00 - 0,60 | 0,60 - 0,50 |
| • pistas de 3 faixas* (m)  | 3,00 - 2,50 | 2,50 - 2,00 | 2,50 - 2,00 |
| • pistas de 4 faixas (m)   | 3,00        | 3,00 - 2,50 | 3,00 - 2,50 |
| Gabarito mínimo vertical (m)                                       | 5,5         | 5,5         | 5,5         |
| Afastamento lateral mínimo da borda do acostamento (m):            |             |             |             |
| • obstáculos contínuos   | 0,5         | 0,5         | 0,5         |
| • obstáculos isolados  | 1,5         | 1,5         | 1,5         |
| Largura do canteiro central (Classe I-A):                          |             |             |             |
| • seção restrita**   | 3 - 7 m     | 3 - 7 m     | 3 - 7 m     |
| • mínimo em interseções em nível                                   | $\geq 6$ m  | $\geq 6$ m  | $\geq 6$ m  |
| • excepcional  | 10 - 12 m   | 10 - 12 m   | 10 - 12 m   |

\* Quando for dispensável o acostamento interno total, utilizar os valores para pistas de 2 faixas.

\*\* Conforme a largura dos acostamentos internos.

Fonte: DNER

## RODOVIAS CLASSE II

| CARACTERÍSTICAS   | RELEVO  |          |            |
|---|---------|----------|------------|
|   | PLANO   | ONDULADO | MONTANHOSO |
| Velocidade diretriz                                     | 80 km/h | 70 km/h  | 50 km/h    |
| Distância mínima de visibilidade de parada:             |         |          |            |
| • excepcional (m)                                       | 210     | 110      | 65         |
| • recomendada (m)                                       | 115     | 90       | 60         |
| Distância mínima de visibilidade de ultrapassagem (m)   | 680     | 490      | 350        |
| Raio mínimo de curva horizontal, $e=8\%$ (m)            | 230     | 170      | 80         |
| Rampa máxima  | 3 %     | 5 %      | 6 - 7 % *  |
| Valor mínimo de K para curvas verticais convexas:       |         |          |            |
| • excepcional   | 107     | 29       | 10         |
| • recomendado   | 58      | 20       | 9          |
| Valor mínimo de K para curvas verticais côncavas:       |         |          |            |
| • excepcional   | 52      | 24       | 12         |
| • recomendado   | 36      | 19       | 11         |
| Largura da faixa de rolamento (m)                       | 3,6     | 3,5      | 3,3        |
| Largura do acostamento externo (m)                      | 2,5     | 2,5      | 2,0        |
| Gabarito mínimo vertical (m):                           |         |          |            |
| • excepcional   | 5,5     | 5,5      | 5,5        |
| • recomendado   | 4,5     | 4,5      | 4,5        |
| Afastamento lateral mínimo da borda do acostamento (m): |         |          |            |
| • obstáculos contínuos                                  | 0,5     | 0,5      | 0,5        |
| • obstáculos isolados                                   | 1,5     | 1,5      | 1,5        |

\* Valor máximo absoluto.

Fonte: DNER

## RODOVIAS CLASSE III

| CARACTERÍSTICAS   | RELEVO  |          |            |
|---|---------|----------|------------|
|   | PLANO   | ONDULADO | MONTANHOSO |
| Velocidade diretriz                                     | 70 km/h | 60 km/h  | 40 km/h    |
| Distância mínima de visibilidade de parada:             |         |          |            |
| • excepcional (m)                                       | 140     | 85       | 45         |
| • recomendada (m)                                       | 110     | 75       | 45         |
| Distância mínima de visibilidade de ultrapassagem (m)   | 560     | 420      | 270        |
| Raio mínimo de curva horizontal, $e=8\%$ (m)            | 170     | 125      | 50         |
| Rampa máxima:   |         |          |            |
| • excepcional   | 3 %     | 5 %      | 7 %        |
| • recomendada   | 4 %     | 6 %      | 8 %        |
| Valor mínimo de K para curvas verticais convexas:       |         |          |            |
| • excepcional   | 48      | 18       | 5          |
| • recomendado   | 29      | 14       | 5          |
| Valor mínimo de K para curvas verticais côncavas:       |         |          |            |
| • excepcional   | 32      | 17       | 7          |
| • recomendado   | 24      | 15       | 7          |
| Largura da faixa de rolamento (m)                       | 3,5     | 3,3      | 3,3        |
| Largura do acostamento externo (m)                      | 2,5     | 2,0      | 1,5        |
| Gabarito mínimo vertical (m):                           |         |          |            |
| • excepcional   | 5,5     | 5,5      | 5,5        |
| • recomendado   | 4,5     | 4,5      | 4,5        |
| Afastamento lateral mínimo da borda do acostamento (m): |         |          |            |
| • obstáculos contínuos                                  | 0,3     | 0,3      | 0,3        |
| • obstáculos isolados                                   | 0,5     | 0,5      | 0,5        |

Fonte: DNER

## RODOVIAS CLASSE IV

| CARACTERÍSTICAS   | RELEVO     |            |             |
|---|------------|------------|-------------|
|   | PLANO      | ONDULADO   | MONTANHOSO  |
| Velocidade diretriz   | 60 km/h    | 40 km/h    | 30 km/h     |
| Distância mínima de visibilidade de parada: <ul style="list-style-type: none"> <li>• excepcional (m)</li> <li>• recomendada (m)</li> </ul>                      | 85<br>75   | 45<br>45   | 30<br>30    |
| Distância mínima de visibilidade de ultrapassagem (m)   | 420        | 270        | 180         |
| Raio mínimo de curva horizontal, $e=8\%$ * (m)  | 125        | 50         | 25          |
| Rampa máxima: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Subclasse A</li> <li>• Subclasse B</li> </ul>  | 4%<br>6%   | 6%<br>8%   | 8%<br>10%** |
| Valor mínimo de K para curvas verticais convexas: <ul style="list-style-type: none"> <li>• excepcional</li> <li>• recomendado</li> </ul>                        | 18<br>14   | 5<br>5     | 2<br>2      |
| Valor mínimo de K para curvas verticais côncavas: <ul style="list-style-type: none"> <li>• excepcional</li> <li>• recomendado</li> </ul>                        | 17<br>15   | 7<br>7     | 4<br>4      |
| Largura da faixa de rolamento (m): <ul style="list-style-type: none"> <li>• Subclasse A</li> <li>• Subclasse B</li> </ul>                                       | 3,0<br>2,5 | 3,0<br>2,5 | 3,0<br>2,5  |
| Largura do acostamento (m): <ul style="list-style-type: none"> <li>• Subclasse A</li> <li>• Subclasse B</li> </ul>  | 1,3<br>1,0 | 1,3<br>1,0 | 0,8<br>0,5  |
| Gabarito mínimo vertical (m): <ul style="list-style-type: none"> <li>• excepcional</li> <li>• recomendado</li> </ul>  | 5,5<br>4,5 | 5,5<br>4,5 | 5,5<br>4,5  |
| Afastamento lateral mínimo da borda do acostamento (m): <ul style="list-style-type: none"> <li>• obstáculos contínuos</li> <li>• obstáculos isolados</li> </ul> | 0,3<br>0,5 | 0,3<br>0,5 | 0,3<br>0,5  |

\* Enquanto não pavimentada, a taxa máxima de superelevação deve limitar-se a 4%.

\*\* Extensão limitada a 300 metros contínuos.

Fonte: DNER

## BIBLIOGRAFIA

- AASHTO – “*A Policy on Geometric Design of Highways and Streets*”. Washington, D. C., 1984.
- AUSTROADS – “*Rural Road Design: A Guide to the Geometric Design of Rural Roads*”. Austroads National Office, Sydney, 1989.
- BARNETT, J. – “*Transition Curves for Highways*”. Public Road Administration, Washington, D. C., 1940.
- BORGES, Alberto de Campos – “*Topografia*”. Editora Edgard Blücher Ltda, São Paulo, 1977.
- BOTTURA, Ettore José & KABBACH JR., Felipe Issa – “*Projeto Geométrico em Vias de Transportes-Notas de Aula*”. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1993.
- CAMPOS, Raphael do Amaral – “*Projeto de Estradas*”. Grêmio Politécnico, USP, São Paulo, 1979.
- CARCIENTE, Jacob – “*Carreteras*”. Ediciones Vega, Caracas, 1985.



- CARVALHO, Carlos Alexandre Braz – “Estradas – Projeto (Concordância Vertical)”. Universidade Federal de Viçosa, 1993.
- CARVALHO, Carlos Alexandre Braz, *et al.* – “Estradas – Projeto (Introdução, Concordância Horizontal, Super elevação e Superlargura)”. Universidade Federal de Viçosa, 1993.
- CARVALHO, M. Pacheco de – “Construção da Infraestrutura de Estradas de Rodagem”. Editora Científica, Rio de Janeiro, 1964.
- CARVALHO, M. Pacheco de – “Curso de Estradas”. Editora Científica, Rio de Janeiro, 1966.
- CATERPILLAR BRASIL S.A. – “Princípios Básicos de Terraplenagem”, 1977.
- CRAUS, J. & LIVNEH, M – “Superelevation and Curvature of Horizontal Curves”. Transportation Research Record 685, TRB, National Research Council, Washington, D.C.
- DER-SP – “Manual Básico de Estradas Vicinais”. São Paulo, 1987.
- DNER – “Normas para Projeto Geométrico de Estradas de Rodagem”. Rio de Janeiro, 1975.
- DNER – “Instruções para Super elevação e Superlargura em Projetos Rodoviários”. Rio de Janeiro, 1978.
- DNER – “Manuais de Serviços de Consultoria para Estudos de Projetos Rodoviários”. Rio de Janeiro, 1978.
- DNER – “Instruções para Projeto Geométrico em Rodovias Rurais”. Rio de Janeiro, 1979.
- DOMINGUES, Felipe Augusto Aranha – “Topografia – Estudo da Plan-ta Topográfica”. Universidade de São Paulo, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, São Paulo, 1978.
- EASA, Said M. – “Design Considerations for Highway Reverse Curves”. Transportation Research Record 1445, TRB, National Research Council, Washington, D.C., p.1-11.
- EASA, Said M. – “Estimating Earthwork Volumes of Curved Roadways: Mathematical Model”. Journal of Transportation Engineering, Vol. 118(6), 1992, p. 834-849.
- EASA, Said M. – “Lateral Clearance Needs on Compound Horizontal Curves”. Journal of Transportation Engineering, Vol. 119(1), 1993, p. 111-123.
- EASA, Said M. – “Unified Design of Horizontal Circular Curves”. Journal of Transportation Engineering, Vol. 119(1), 1993, p. 94-110.
- EASA, Said M. – “Unified Design of Vertical Parabolic Curves”. Survey and Land Inf. Systems, 51(2), p. 105-112.

- FIGUEIRA, Fernando M. M. – “*Estudo e Concepção de Estradas*”. Livraria Almedina. Coimbra, Portugal, 1984.
- FERREIRA, A. B. H. – “*Minidicionário da Língua Portuguesa*”. Nova Fronteira, Rio de Janeiro, 1988.
- FONTES, Luiz Carlos – “*Engenharia de Estradas – Projeto Geométrico*”. Universidade Federal da Bahia, 1991.
- FOX, M. L. – “*Relation between Curvature and Speed*”. Proceedings, Highway Research Board, Washington, D. C., 1940.
- GLENNON, J. C. – “*Evaluation of Design Criteria for Operating Trucks Safety on Grades*”. HRR n. 312, Highway Research Board. Washington, D. C., 1970.
- HICKERSON, T. F. – “*Route Location and Design*”. McGraw-Hill Book Company, New York, 1967.
- HIGHWAY RESEARCH BOARD – “*Highway Design Models*”. HR Circular 141, Washington, D. C., 1973.
- KANELLAIDIS, G. – “*Aspects of Highway Superlevation Design*”. Journal of Transportation Engineering, Vol. 117(6), 1991, p. 624-632.
- LEHMANN, C. H. – “*Geometria Analítica*”. Editora Globo. São Paulo, 1991.
- MUNEM, M. A. & FOULIS, D. J. – “*Cálculo*”. Editora Guanabara Dois. Rio de Janeiro, 1982.
- PAULA, Haroldo Gonitjo – “*Características Geométricas das Estradas*”. Belo Horizonte, Edições Engenharia UFMG.
- PEIXOTO, Creso de Franco – “*Introdução à Geometria de Vias – Notas de Aula*”. São Paulo, 1996.
- PEREIRA, Antonio Lopes, – “*Estradas, Projeto-Construção*”. Ao Livro Técnico Ltda, Rio de Janeiro, 1958.
- PIMENTA, Carlos Reynaldo Toledo – “*Projeto de Estradas – Notas de Aula*”. Volumes 1, 2 e 3, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1981.
- PIMENTA, Carlos Reynaldo Toledo – “*Projeto de Terraplenagem – Notas de Aula*”. Universidade de São Paulo, São Carlos, 1981.
- PIMENTA, Carlos Reynaldo Toledo – “*Análise Comparativa de Critérios para a Escolha da Superlevação das Estradas de Rodagem*”. Dissertação de Mestrado, USP - Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 1975.
- PRISK, C. W. – “*Passing Practice on Rural Highways*”. Proceedings, Highway Research Board, Washington, D. C., 1941.

ROY, B. K. - "Geometric Design of Compound Horizontal Curves".

Journal of Transportation Engineering - ASCE, Vol. 120, Nº 4, July/August, 1994.

ROYAL-DAWSON, F. G. - "Elements of Curve Design". E. & F. N. Spon Ltd, London, 1932.

SENÇO, Wlastermiller de - "Terraplenagem". Grêmio Politécnico, Universidade de São Paulo, 1980.

SENÇO, Wlastermiller de - "Estradas de Rodagem - Projeto". Grêmio Politécnico, Universidade de São Paulo, 1980.

SMITH, B. L. & LAMM, R. - "Coordination of Horizontal and Vertical Alignment with Regard to Highway Eshetics". Transportation Research Record 1445, TRB, National Research Council, Washington, D.C., p. 73-85.

SOUZA, José Octávio de - "Estradas de Rodagem", Nobel, São Paulo, 1981.

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD - "Highway Capacity Manual". TRB Special Report 209, Washington, D. C., 1985.

WAISSI, G. R. & CLEVELAND, D. E. - "Sight Distance Relationships Involving Horizontal Curves". Transportation Research Record 1122, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 1987.

Impressão e acabamento: Lis Gráfica e Editora Ltda.

# GEOSSINTÉTICOS Bidim

## opções com alta tecnologia.

### Geotêxtil Náutico

Com mais de 25 anos de tradição, único de filamentos contínuos agulhados, 100% poliéster.

**bidim**

### Geotêxtil Tecido

100% polipropileno com a qualidade

**bidim**

### Geocélula

Sistema de confinamento celular em polietileno de alta densidade para revestimento e proteção em canais, contenções e controle de erosão.

**GEOWEB**

**Geogrim**

### Geodreno

Prático sistema de drenagem para qualquer tipo de pavimento por meio de drenagem de plástico envolvida com geotêxtil reciclado Bidim®

**multidren**

### Geogrelha

Reforço e estabilização de solos com políester de alta resistência

**Fortrac**

**bidim**

**BBA**  
GRUPO

**BBA NONWOVENS**

Com mais de 25 anos de experiência e ampla linha de geossintéticos, a Bidim® está sempre evoluindo. E agora, integra o grupo BBA Nonwovens, terceiro maior fabricante de náuticos no mundo. É mais garantia de versatilidade, qualidade e tecnologia em seus produtos. Use a tradição e inovação dos geossintéticos Bidim® e ganhe mais vida para a sua obra.

**BIDIM INDÚSTRIA E COMÉRCIO LTDA.**  
R. IGUATEMI, 192 - 17º ANDAR - CJ. 173 e 174  
01451-010 - SÃO PAULO - SP - BRASIL  
Tele.: (011) 866-6623 Fax: (011) 866-1492  
E-mail: bidimsp@bidim.com.br