



Apostila da Disciplina ECV 5115:

# **Projeto Geométrico de Estradas**

Professor: Shu Han Lee  
Semestre: 2000/1

Shu Han Lee

# INTRODUÇÃO AO PROJETO GEOMÉTRICO DE RODOVIAS

Parte 1

Colaboradoras:

CAROLINE ANTUNES BUCCIANO

CAMILLE GHEDIN HALISKI

Programa Especial de Treinamento  
Engenharia Civil – UFSC

Florianópolis 2000





## DEDICATÓRIA

Dedico esta publicação à memória de dois bons amigos:

**Renato Pereira da Cunha** (1947 – 1982) – o “Paulista” – meu colega de turma, amigo de primeira hora da Academia, na velha Escola de Engenharia da UFRGS (onde nos formamos, em 1970), e companheiro de jornadas insones no aprendizado da Engenharia Civil, profissão que soube exercer com dinamismo e inteligência;

**Sérgio Rogério Beims** (1947 – 1983), colega dos primeiros anos de carreira no DER/SC e na Secretaria dos Transportes e Obras, onde desempenhou com invulgar competência funções como Engenheiro Civil, Diretor de Construção, Diretor de Estudos e Projetos e como Secretário Adjunto dos Transportes e Obras.

Atenuado, pelo lenitivo do tempo, o choque pela perda destes amigos que tive, surpreendome às vezes a imaginar que Alguém, precisando reformular Seu sistema viário, convocou Engenheiros competentes para a tarefa... Que estranhos caminhos estarão eles a planejar, projetar ou construir?









## APRESENTAÇÃO

Esta publicação versa sobre aspectos básicos relacionados com o projeto geométrico de rodovias, com ênfase nos procedimentos de cálculo analítico utilizados para a definição dos parâmetros que caracterizam a geometria das rodovias adequadamente projetadas.

Não são objeto de tratamento as questões que dizem respeito ao projeto geométrico de interseções, limitando-se o conteúdo aos assuntos que integram o escopo da disciplina ECV 5115 – Projeto Geométrico de Estradas<sup>1</sup>, oferecida pelo Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina para os cursos de graduação em Engenharia Civil e em Engenharia de Produção e Sistemas.

O texto foi organizado e apresentado tendo como objetivo principal auxiliar o aluno da disciplina no aprendizado dos conceitos e técnicas elementares relacionados com o projeto geométrico de rodovias, supondo que seja o primeiro contato do aluno com o tema.

Muito do que está escrito foi obtido a partir de conhecimentos gerados e difundidos por intermédio de outras fontes e publicações especializadas, referenciadas no texto, não se pretendendo aprofundar os tópicos além do grau de conhecimento adequado para uma disciplina semestral no nível de graduação.

Esta primeira parte, ora divulgada, avança até o dimensionamento dos elementos planimétricos, no projeto geométrico do eixo de uma rodovia. Na parte seguinte, ainda em estágio de preparação, pretende-se cobrir a matéria relacionada com o projeto em perfil, com o projeto das seções transversais, e com os estudos pertinentes à movimentação de terras.

Para facilitar o acesso dos interessados ao conteúdo desta publicação, o texto está sendo disponibilizado na *internet*, na *homepage* do Departamento de Engenharia Civil / PET, onde poderá ser acessada. Com o mesmo objetivo, esta parte será divulgada na forma de apostila, visando minimizar o preço para sua aquisição pelos interessados.

Pretende-se, quando concluída a segunda parte, reunir o material para eventual publicação em forma de livro didático.

Tratando-se de material desenvolvido para fins educativos, o autor solicita e agradece antecipadamente comentários e críticas ao conteúdo da publicação, com vistas ao seu aprimoramento, podendo as manifestações ser dirigidas ao endereço eletrônico [ecv1shl@ecv.ufsc.br](mailto:ecv1shl@ecv.ufsc.br).

SHU HAN LEE

*Eng. Civil, M.Sc.*

---

<sup>1</sup> Esta é uma denominação imprópria; seria mais correto empregar a denominação "projeto geométrico de rodovias" para a disciplina, pois o termo "estrada" é utilizado para designar via rural não pavimentada, ao passo que o termo "rodovia" designa via rural pavimentada, situação para a qual são elaborados os projetos geométricos.







# SUMÁRIO

<b>LISTA DE ILUSTRAÇÕES</b> .....	ix
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	xi
<b>1 A ORGANIZAÇÃO DO SETOR RODOVIÁRIO</b> .....	1
1.1 INTRODUÇÃO .....	1
1.2 O FINANCIAMENTO DO SETOR RODOVIÁRIO .....	1
1.3 A ORGANIZAÇÃO DO SETOR PÚBLICO .....	2
1.4 O PLANO NACIONAL DE VIAÇÃO .....	4
<b>2 A RODOVIA</b> .....	7
2.1 NOMENCLATURA DAS RODOVIAS .....	7
2.2 CLASSIFICAÇÃO FUNCIONAL DE RODOVIAS .....	9
2.3 CLASSIFICAÇÃO TÉCNICA DAS RODOVIAS .....	12
2.3.1 Designação dos elementos geométricos .....	13
2.3.2 Principais características técnicas de projeto .....	16
2.3.3 Classes de projetos .....	18
2.3.3.1 Critérios para a definição da classe de projeto .....	22
2.3.3.2 Algumas observações a respeito das Normas do DNER .....	23
<b>3 ESTUDOS DE TRAÇADO</b> .....	25
3.1 INTRODUÇÃO .....	25
3.2 RECONHECIMENTO .....	25
3.2.1 Processos de Reconhecimento .....	26
3.3 EXPLORAÇÃO .....	27
3.4 CÁLCULOS DA POLIGONAL .....	29
3.4.1 Cálculo de Azimutes .....	29
3.4.2 Cálculo de coordenadas .....	30
3.5 DEFINIÇÃO DOS TRAÇADOS .....	31
3.5.1 Recomendações das Normas do DNER .....	33
3.5.2 Defeitos dos traçados .....	36
3.6 VEÍCULO DE PROJETO .....	39
<b>4 ELEMENTOS PLANIMÉTRICOS</b> .....	45
4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	45
4.2 ESTAQUEAMENTO .....	46
4.3 CONCORDÂNCIA COM CURVA CIRCULAR SIMPLES .....	47
4.3.1 Cálculo da concordância .....	48
4.3.2 Locação de curvas circulares .....	50
4.3.3 Métodos de locação .....	54
4.3.3.1 Locação por estaca fracionária .....	54
4.3.3.2 Locação por estaca inteira .....	58
4.3.4 Raios de curva tabelados .....	59
<b>5 SUPERELEVÇÃO E SUPERLARGURA</b> .....	63
5.1 COMENTÁRIOS .....	63

5.2 SUPERELEVAÇÃO .....	63
5.2.1 Valores mínimos e máximos de superelevação .....	67
5.2.2 Raios mínimos das concordâncias horizontais .....	68
5.2.3 Superelevações a adotar nas concordâncias .....	69
5.3 SUPERLARGURA .....	73
5.3.1 Cálculo da superlargura .....	73
5.3.2 Considerações adicionais sobre a superlargura .....	76
5.3.3 Disposição da superlargura .....	78
<b>6 CURVAS DE TRANSIÇÃO .....</b>	<b>81</b>
6.1 A GEOMETRIA E A DINÂMICA DE MOVIMENTO .....	81
6.2 A CLOTÓIDE OU ESPIRAL DE TRANSIÇÃO .....	82
6.3 TIPOS DE TRANSIÇÃO .....	83
6.3.1 Transição a raio e centro conservados .....	84
6.3.2 Transição a centro conservado .....	84
6.3.3 Transição a raio conservado .....	85
6.4 ESQUEMA DA TRANSIÇÃO COM A ESPIRAL .....	86
6.5 DESENVOLVIMENTO DA SUPERLARGURA E DA SUPERELEVAÇÃO .....	87
6.5.1 Desenvolvimento com curva de transição .....	88
6.5.1.1 Desenvolvimento da superlargura .....	88
6.5.1.2 Desenvolvimento da superelevação .....	89
6.5.2 Desenvolvimento sem curva de transição .....	91
6.6 COMPRIMENTO DE TRANSIÇÃO .....	93
6.6.1 Comprimento mínimo de transição .....	94
6.6.1.1 Critério do comprimento mínimo absoluto .....	94
6.6.1.2 Critério da fluência ótica .....	94
6.6.1.3 Critério do conforto .....	95
6.6.1.4 Critério da máxima rampa de superelevação .....	96
6.6.2 Comprimento máximo de transição .....	98
6.6.2.1 Critério do máximo ângulo central da Clotóide .....	98
6.6.2.2 Critério do tempo de percurso .....	98
6.6.3 Critérios complementares .....	99
6.6.3.1 Critério de arredondamento .....	99
6.6.3.2 Critério da extensão mínima com superelevação total .....	99
6.6.3.3 Critério de aparência geral .....	100
6.6.3.4 Critérios para concordâncias com curvas compostas .....	100
6.7 CÁLCULO DA CONCORDÂNCIA COM A ESPIRAL .....	102
6.7.1 Ângulo central da espiral .....	102
6.7.2 Ângulo central da curva circular .....	103
6.7.3 Desenvolvimento em curva circular .....	103
6.7.4 Coordenadas cartesianas da espiral .....	104
6.7.5 Parâmetros do recuo da curva circular .....	105
6.7.6 Tangente exterior .....	107
6.8 LOCAÇÃO DA ESPIRAL DE TRANSIÇÃO .....	110
6.8.1 Locação com o teodolito na origem da espiral .....	110
6.8.2 Locação com mudanças do teodolito .....	111
6.8.3 Tabelas de locação .....	115
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>119</b>

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

2.1 SIGLA PARA AS RODOVIAS FEDERAIS .....	7
2.2 CATEGORIAS DE RODOVIAS FEDERAIS .....	8
2.3 RELAÇÃO ENTRE AS FUNÇÕES DE MOBILIDADE E DE ACESSO .....	10
2.4 CURVA DE RENDIMENTOS DECRESCENTES .....	11
2.5 CONFIGURAÇÕES TÍPICAS DE SEÇÕES TRANSVERSAIS .....	15
2.6 ELEMENTOS DE SEÇÃO TRANSVERSAL: RODOVIAS EMPISTA SIMPLES .....	15
2.7 ELEMENTOS DE SEÇÃO TRANSVERSAL: RODOVIAS EM PISTA DUPLA .....	15
3.1 ÂNGULOS INTERNOS E DEFLEXÕES EM POLIGONAIS ORIENTADAS .....	29
3.2 DEFLEXÕES E AZIMUTES EM POLIGONAIS ORIENTADAS .....	30
3.3 SISTEMA CARTESIANO E COORDENADAS ABSOLUTAS .....	31
3.4 COMBINAÇÃO DOS ELEMENTOS EM PLANTA E EM PERFIL .....	32
3.5 POLÍTICAS PARA CONCORDÂNCIAS HORIZONTAIS .....	33
3.6 HARMONIA DOS TRAÇADOS COM A PAISAGEM .....	33
3.7 VARIAÇÃO DOS RAIOS DE CURVAS CONSECUTIVAS .....	34
3.8 CRITÉRIOS PARA ESCOLHA DE RAIOS DE CURVAS SUCESSIVAS .....	34
3.9 COORDENAÇÃO DE CURVAS HORIZONTAIS E VERTICAIS .....	35
3.10 PISTA SEM DOBRA ÓTICA .....	36
3.11 PISTA COM DOBRA ÓTICA .....	36
3.12 DOBRAS E DEFEITOS ÓTICOS .....	37
3.13 DEFEITOS EM TRAÇADOS : MERGULHO EM TANGENTE .....	37
3.14 DEFEITOS EM TRAÇADOS : MERGULHO EM CURVA .....	37
3.15 DEFEITOS EM TRAÇADOS : ABAULAMENTOS (TOBOGÃ) .....	37
3.16 DEFEITOS EM TRAÇADOS : ONDULAÇÕES NA CURVA .....	38
3.17 DEFEITOS EM TRAÇADOS : MERGULHO RASO .....	38
3.18 DEFEITOS EM TRAÇADOS : MERGULHO PROFUNDO .....	38
3.19 DEFEITOS EM TRAÇADOS : SALTO .....	38
3.20 DEFEITOS EM TRAÇADOS : SALTO COM DEFLEXÃO .....	39
3.21 DEFEITOS EM TRAÇADOS : INÍCIO DA CURVA HORIZONTAL NA ÁREA CONVEXA .....	39
3.22 DIMENSÕES E GABARITOS DE GIRO : VEÍCULO TIPO CO .....	41
3.23 DIMENSÕES E GABARITOS DE GIRO : VEÍCULO TIPO VP .....	42
3.24 DIMENSÕES E GABARITOS DE GIRO : VEÍCULO TIPO O .....	42
3.25 DIMENSÕES E GABARITOS DE GIRO : VEÍCULO TIPO SR .....	43
4.1 ELEMENTOS DO EIXO DE UMA RODOVIA .....	45
4.2 ESQUEMA DA CONCORDÂNCIA COM CURVA CIRCULAR SIMPLES .....	47
4.3 ALINHAMENTOS PARA CÁLCULO DE CONCORDÂNCIAS .....	49
4.4 DESENHO DO EIXO PROJETADO .....	50
4.5 LOCAÇÃO POR DEFLEXÕES ACUMULADAS .....	51
4.6 GRAU DA CURVA CIRCULAR PARA UMA CORDA $c$ .....	51
4.7 DEFLEXÃO DA CURVA CIRCULAR PARA UMA CORDA $c$ .....	52
4.8 LOCAÇÃO POR ESTACA FRACIONÁRIA .....	55

4.9 MUDANÇA DE APARELHO NA LOCAÇÃO DA CURVA CIRCULAR .....	56
5.1 FORÇAS ATUANTES SOBRE UM VEÍCULO EM TRAJETÓRIA CURVA .....	64
5.2 MÉTODO DE BALANCEAMENTO DA SUPERELEVAÇÃO E DO ATRITO .....	70
5.3 ESQUEMA PARA DETERMINAÇÃO DA SUPERLARGURA .....	74
6.1 CURVA DE TRANSIÇÃO .....	82
6.2 FORMA GEOMÉTRICA DA CLOTÓIDE OU ESPIRAL DE TRANSIÇÃO .....	83
6.3 TRANSIÇÃO A RAIOS E CENTRO CONSERVADOS .....	84
6.4 TRANSIÇÃO A CENTRO CONSERVADO .....	85
6.5 TRANSIÇÃO A RAIOS CONSERVADOS .....	86
6.6 ESQUEMA DA CONCORDÂNCIA COM ESPIRAL DE TRANSIÇÃO .....	87
6.7 DESENVOLVIMENTO DA SUPERLARGURA .....	88
6.8 DESENVOLVIMENTO DA SUPERLARGURA COM CURVA DE TRANSIÇÃO .....	89
6.9 DESENVOLVIMENTO DA SUPERELEVAÇÃO .....	90
6.10 DESENVOLVIMENTO DA SUPERELEVAÇÃO COM CURVA DE TRANSIÇÃO .....	91
6.11 DESENVOLVIMENTO DA SUPERLARGURA E DA SUPERELEVAÇÃO SEM CURVA DE TRANSIÇÃO .....	92
6.12 TRANSIÇÃO EM CURVA CIRCULAR: $L_c$ DISPOSTO EM ESTACAS FRACIONÁRIAS .....	93
6.13 TRANSIÇÃO EM CURVA CIRCULAR: $L_c$ DISPOSTO EM ESTACAS INTEIRAS .....	93
6.14 RAMPA DE SUPERELEVAÇÃO .....	98
6.15 ÂNGULOS E ARCOS DA ESPIRAL .....	102
6.16 ÂNGULOS CENTRAIS DA CONCORDÂNCIA .....	103
6.17 COORDENADAS CARTESIANAS DA ESPIRAL .....	104
6.18 PARÂMETROS DA TRANSIÇÃO A RAIOS CONSERVADOS .....	105
6.19 DESENHO DO EIXO PROJETADO COM CURVAS DE TRANSIÇÃO .....	109
6.20 LOCAÇÃO DE PONTOS DA ESPIRAL .....	110
6.21 DEFLEXÕES NUM PONTO QUALQUER DA ESPIRAL .....	112



## LISTA DE TABELAS

1.1 ORGANIZAÇÃO DA ADMINISTRAÇÃO PÚBLICA DO SETOR RODOVIÁRIO .....	3
1.2 PLANOS SETORIAIS DE TRANSPORTES NO BRASIL .....	4
2.1 PARÂMETROS PARA A CLASSIFICAÇÃO FUNCIONAL DE RODOVIAS .....	12
2.2 CLASSES DE PROJETO PARA NOVOS TRAÇADOS DE RODOVIAS EM ÁREAS RURAIS – DNER .....	19
2.3 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS PARA O PROJETO DE RODOVIAS NOVAS .....	20
2.4 NORMAS ADMISSÍVEIS PARA O MELHORAMENTO DE ESTRADAS EXISTENTES .....	21
2.5 NORMAS PARA O PROJETO DE RODOVIAS VICINAIS .....	22
3.1 DIMENSÕES BÁSICAS DOS VEÍCULOS DE PROJETO .....	40
4.1 CORDAS ADMISSÍVEIS PARA AS CURVAS .....	46
4.2 LOCAÇÃO DA CURVA CIRCULAR POR ESTACA FRACIONÁRIA .....	57
4.3 LOCAÇÃO DA CURVA CIRCULAR POR ESTACA INTEIRA .....	58
4.4 RAIOS DE CURVA TABELADOS .....	60
4.5 LOCAÇÃO POR ESTACA FRACIONÁRIA: RAIOS TABELADOS .....	60
5.1 VALORES MÁXIMOS ADMISSÍVEIS DO COEFICIENTE $f$ .....	66
5.2 VALORES DE $R$ QUE DISPENSAM SUPERELEVAÇÃO .....	67
5.3 RAIOS MÍNIMOS DE CURVA PARA PROJETOS .....	69
5.4 VELOC. MÉDIAS DE OPERAÇÃO ( $V_R$ ) e COEFICIENTES ( $f_{máx}$ ) .....	69
5.5 VALORES DE SUPERELEVAÇÃO PARA $e_{máx} = 8\%$ .....	72
5.6 VALORES DE SUPERELEVAÇÃO PARA $e_{máx} = 10\%$ .....	72
5.7 VALORES DE GABARITO LATERAL .....	75
6.1 RAIOS DE CURVA QUE DISPENSAM CURVAS DE TRANSIÇÃO .....	81
6.2 RAMPAS DE SUPERELEVAÇÃO ADMISSÍVEIS : CASO BÁSICO .....	97
6.3 FATORES MULTIPLICADORES PARA $L_{min}$ .....	97
6.4 VALORES PARA LOCAÇÃO DA ESPIRAL .....	111
6.5 DEFLEXÕES PARA LOCAÇÃO DA ESPIRAL .....	114
6.6 TABELA DE LOCAÇÃO PARA $R=61,41\text{ m}$ e $L_C = 40,00\text{m}$ .....	116
6.7 LOCAÇÃO POR ESTACA INTEIRA: TABELA DE LOCAÇÃO PARA O PRIMEIRO RAMO DA ESPIRAL .....	117
6.8 LOCAÇÃO POR ESTACA INTEIRA: TABELA DE LOCAÇÃO PARA O SEGUNDO RAMO DA ESPIRAL .....	117



# 1

## A ORGANIZAÇÃO DO SETOR RODOVIÁRIO

O Presidente da República, (...) Considerando que a estrada de rodagem, graças ao grau de perfeição já atingido pelo automóvel, representa hoje elemento de fundamental importância no sistema de viação interna de qualquer país; (...) Considerando que o desenvolvimento rodoviário do Brasil é, graças à imensidade do território pátrio, um trabalho gigantesco a desafiar a energia realizadora de muitas gerações; (...) Considerando tudo o mais que lhe representou o Ministro de Estado dos Negócios da Viação e Obras Públicas, decreta: (...) Art. 28. Fica criado o Fundo Rodoviário Nacional, destinado à construção, conservação e melhoramentos das rodovias compreendidas no Plano Rodoviário Nacional (...).

José Linhares (Presidente); Maurício Joppert da Silva (Ministro) et al. Decreto-Lei nº 8.463, de 27 dez. 1945.

### 1.1 INTRODUÇÃO

A infra-estrutura rodoviária pública do Brasil, reorganizada no pós-guerra, experimentou uma evolução notável a partir de fins da década de 50, impulsionada pela instalação da indústria automobilística no país e pela efetivação de um modelo de vinculação tributária, anteriormente criado, que dava sustentação financeira à conservação e à expansão da rede de rodovias.

Consolidou-se, concomitantemente, a implementação das estruturas institucionais públicas, principalmente no nível federal e nos níveis estaduais, atribuindo a entidades departamentais e autárquicas competentes as respectivas responsabilidades pela execução das políticas rodoviárias federal e estaduais.

Complementado com o manto de uma legislação apropriada, que evoluiu para a formatação de sucessivos Planos Nacionais de Viação, essa organização ensejou não só o desenvolvimento físico da infra-estrutura rodoviária, mas também a evolução tecnológica do setor – que contava com recursos definidos – tendo o país chegado a vislumbrar as fronteiras do conhecimento da tecnologia rodoviária em meados da década de 70.

A partir daí, mudanças na política de distribuição dos recursos tributários acabaram por extinguir o modelo de financiamento que viabilizava o desenvolvimento do setor rodoviário que, sem recursos assegurados, tem experimentado desde então franca involução.

Neste capítulo comentam-se os aspectos mais relevantes dos acontecimentos que resultaram na estruturação do setor público rodoviário brasileiro, no formato que persiste até o presente.

### 1.2 O FINANCIAMENTO DO SETOR RODOVIÁRIO

A organização sistêmica e o efetivo desenvolvimento do setor de transporte rodoviário no Brasil, com suporte legal, institucional e financeiro, no contexto de um Sistema Nacional de Viação, tiveram seu efetivo início logo após o encerramento da Segunda Guerra Mundial, com a instituição do Decreto-Lei nº 8.463, de 27 dez. 1945.

Este instrumento legal resultou de um processo que foi representado pelo Engenheiro Maurício Joppert da Silva (1891 - 1985), quando exercia o cargo de Ministro de Estado dos Negócios da Viação e Obras Públicas, ao então Presidente da República, José Linhares.

O citado Decreto-Lei ficou conhecido como *Lei Joppert*, em homenagem ao inspirado Engenheiro, e se constituiu no instrumento jurídico que reorganizou o Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – DNER (órgão responsável pelo setor rodoviário, criado em 1937), dando-lhe a forma de Autarquia, com estrutura técnica e administrativa adequada. Além disso, a Lei Joppert veio a se constituir também na base jurídica que fundamentou a organização da administração pública do setor rodoviário nos Estados e Territórios, no Distrito Federal e mesmo nos Municípios do Brasil.

Mais que isso, a Lei Joppert criou o Fundo Rodoviário Nacional (FRN), suprido com recursos financeiros oriundos da arrecadação de tributos incidentes sobre a propriedade de veículos automotores e sobre o consumo de combustíveis e de lubrificantes<sup>2</sup>. Os recursos desse fundo, por força de lei, eram investidos exclusivamente no desenvolvimento do setor rodoviário.

Essa era a lógica do processo: de um lado, foram criados recursos tributários específicos para o desenvolvimento do setor rodoviário, e de outro, foi criada (ou reorganizada) a estrutura técnico-administrativa competente para gerir a aplicação desses recursos.

Esse modelo – de vinculação tributária – deu sustentação à implementação de nosso sistema rodoviário, que experimentou ampla expansão nas décadas de 60 e 70, e que até o presente permanece responsável pela movimentação das maiores parcelas de fluxos de cargas e de passageiros no país, relativamente aos demais modais. As estatísticas oficiais disponíveis apontam que, no ano de 1998, o modo rodoviário foi responsável por 62,60 % da quantidade de carga transportada no Brasil, em toneladas-quilômetro, e por 96,02 % do número de passageiros-quilômetro transportados no país (GEIPOT, 1999, p. 271-272).

No entanto, já a partir de meados da década de 70, no contexto de um processo de modificação da distribuição dos recursos tributários, foram sendo gradualmente transferidos para outros fundos os recursos alocados ao FRN. Essa política de esvaziamento do FRN foi intensificada com a desfederalização dos tributos relativos à propriedade de veículos automotores, ao consumo de combustíveis e lubrificantes, e à prestação de serviços de transporte rodoviário, todos oriundos dos usuários de rodovias.

Com o esvaziamento dos recursos do FRN, a administração pública do setor rodoviário passou a contar basicamente com recursos orçamentários, escassos e disputados com outras áreas igualmente ou mais carentes, e com financiamentos de entidades de desenvolvimento, dependendo da capacidade de endividamento disponível dos órgãos públicos.

O processo de desmonte do modelo de vinculação tributária foi finalmente consolidado com a promulgação da Constituição Federal de 1988, que vedou expressamente a vinculação de receitas de impostos a órgão, fundo ou despesa (exceto para a educação).

Desde então, formas alternativas de financiamento do setor têm sido buscadas, dentre as quais destacam-se as gestões no sentido de reinstaurar um Fundo Rodoviário (apenas para conservação de rodovias), as modalidades de concessão de rodovias à iniciativa privada (para viabilizar a realização de investimentos mediante a cobrança de pedágio dos usuários), e as tentativas de instituição de imposto seletivo sobre hidrocarbonetos, derivados de petróleo, combustíveis e óleos lubrificantes, com vinculação de parcelas a investimentos em infra-estrutura do Sistema Nacional de Viação.

### 1.3 A ORGANIZAÇÃO DO SETOR PÚBLICO

Quando instituído o FRN, 40% dos recursos do fundo eram destinados à União, sendo os 60% restantes alocados aos Estados, Territórios e Distrito Federal.

No âmbito federal, a estrutura governamental para o setor rodoviário foi organizada de forma a dividir os encargos em dois níveis distintos: um responsável pela formulação da política de transporte rodoviário, e outro pela execução da política assim formulada.

As atividades relacionadas com a formulação da política de transporte rodoviário foram atribuídas a um ministério (atualmente, o Ministério dos Transportes), e as relacionadas à execução da política de transporte rodoviário foram atribuídas ao DNER, órgão que foi encarregado de gerir a aplicação dos recursos do FRN destinados à União.

Ao DNER cabia também gerenciar a distribuição da parcela de 60% dos recursos do FRN destinada aos Estados, Territórios e Distrito Federal, que era rateada entre essas unidades

---

<sup>2</sup> Posteriormente, já em 1976, foram também incorporados ao FRN recursos oriundos do Imposto Sobre o Transporte Rodoviário de Passageiros e de Cargas – ISTR (mais tarde transformado em Imposto Sobre Transportes Rodoviários – IST).

administrativas, mediante quotas<sup>3</sup> estabelecidas proporcionalmente aos respectivos consumos de combustíveis e lubrificantes líquidos (36%), às respectivas populações (12%) e às respectivas superfícies territoriais (12%).

Para habilitarem-se ao recebimento dos recursos do FRN que lhes cabiam, os Estados, Territórios e o Distrito Federal foram instados a criar seus próprios órgãos setoriais, na forma de autarquias (Departamentos de Estradas de Rodagem – DER, ou Departamentos Autônomos de Estradas de Rodagem – DAER).

Assim, as estruturas governamentais dos Estados (e do Distrito Federal) para o setor rodoviário acabaram sendo organizadas de forma similar à do governo federal: às Secretarias de Estado foram atribuídas as tarefas relacionadas com a formulação das políticas estaduais de transporte rodoviário, e às suas autarquias (DER ou DAER) foram reservados os encargos relacionados com a execução das respectivas políticas rodoviárias estaduais.

Três anos após a instituição da *Lei Joppert*, os Municípios foram também integrados ao modelo como beneficiários dos recursos do FRN, por força da Lei nº 302, de 13 jul. 1948, passando a distribuição dos recursos vinculados a ser feita nas proporções de 40% para a União, 48% para os Estados, Territórios e Distrito Federal, e 12% para os Municípios<sup>4</sup>.

Com a inclusão dos Municípios como beneficiários dos recursos do FRN, o critério para a repartição da parcela que cabia aos Estados, Territórios e Distrito Federal, bem assim da parcela que cabia aos Municípios, também sofreu ajustamentos, e o rateio passou a ser efetuado proporcionalmente às superfícies (2/10), às populações (2/10), e aos consumos de lubrificantes e combustíveis líquidos (6/10) das respectivas unidades.

No nível municipal, as tarefas de formulação das políticas rodoviárias foram atribuídas geralmente a Secretarias Municipais. No entanto, a organização para as atividades relacionadas com a execução dessas políticas municipais de transporte rodoviário acabou sendo diferenciada em relação ao que aconteceu nos âmbitos federal e estaduais<sup>5</sup>, verificando-se desde casos de Municípios que estruturaram seus próprios Departamentos Municipais de Estradas de Rodagem (em geral, nos Municípios de maior porte), a casos em que as tarefas relacionadas com a execução das políticas rodoviárias municipais foram atribuídas a órgãos da administração direta ou mesmo assumidas pelos próprios gabinetes dos Prefeitos.

TABELA 1.1 – ORGANIZAÇÃO DA ADMINISTRAÇÃO PÚBLICA DO SETOR RODOVIÁRIO

NÍVEIS DE JURISDIÇÃO	ENTIDADES RESPONSÁVEIS PELA POLÍTICA RODOVIÁRIA	
	FORMULAÇÃO DA POLÍTICA	EXECUÇÃO DA POLÍTICA
Federal	Ministério dos Transportes	DNER
Estadual	Secretarias de Estado	DER, DAER, Fundação DER <sup>(1)</sup> , DERT <sup>(2)</sup> , AGETOP <sup>(3)</sup>
Municipal	Secretarias Municipais	DMER e outras

<sup>(1)</sup> Caso do Estado do Rio de Janeiro, que reconfigurou o DER/RJ como Fundação DER.

<sup>(2)</sup> Caso do Estado do Ceará, que reconfigurou o DAER/CE como Departamento de Edificações, Rodovias e Transportes - DERT.

<sup>(3)</sup> Caso do Estado de Goiás, cujo DER/GO foi extinto, sendo suas atividades absorvidas pela Agência Goiana de Transportes e Obras Públicas (AGETOP).

Ao DNER foram atribuídas as tarefas de proceder anualmente à determinação das quotas que cabiam aos Estados, Territórios e ao Distrito Federal; estas unidades, por sua vez, responsabilizavam-se pela determinação das quotas que cabiam aos respectivos Municípios.

<sup>3</sup> No jargão legal e técnico-administrativo, as quotas eram frequentemente denominadas (incorretamente) de "cotas-partes".

<sup>4</sup> Essas proporções de distribuição sofreram, posteriormente, diversas alterações, incluindo a participação de outros setores de transportes como beneficiários dos recursos do FRN.

<sup>5</sup> A lei nº 302, de 13 jul. 1948, condicionava a liberação dos recursos do FRN que cabiam aos Municípios à manutenção, pelas respectivas organizações administrativas, de um serviço especial de estradas e caminhos municipais.

Para tanto, eram tomados dados oficiais, oriundos do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e de relatórios oficiais dos órgãos rodoviários dos Estados, Territórios, Distrito Federal e Municípios, elaborados a partir de planos rodoviários instituídos por intermédio de leis específicas, sendo os repasses dos recursos procedidos trimestralmente, obedecidas as proporções supra referidas, desde que atendidas as exigências de atualização da legislação e dos dados das respectivas redes rodoviárias<sup>6</sup>.

#### 1.4 O PLANO NACIONAL DE VIAÇÃO

A elaboração de planos setoriais de transportes no Brasil não é uma atividade recente, podendo-se constatar, na literatura técnica, a existência de planos desenvolvidos desde o século passado (vide tabela 1.2). É interessante observar, no entanto, a evolução acontecida desde os planos mais antigos, que compreendiam trabalhos não oficiais, com caráter de planejamento específico, passando gradualmente, a partir da década de 30, para uma concepção de instrumentação formal mais abrangente, envolvendo diferentes modais.

TABELA 1.2 – PLANOS SETORIAIS DE TRANSPORTES NO BRASIL

ANO	DENOMINAÇÃO	OBSERVAÇÕES
1838	Plano Rebelo	Não oficial
1869	Plano Morais	Não oficial
1874/82	Plano Queiroz	Não oficial
1874	Plano Rebouças	Não oficial
1881	Plano Bicalho	Não oficial
1882	Plano Bulhões	Não oficial
1886	Plano Geral de Viação	Não oficial
1890	Plano da Comissão de 1890	Não oficial
1926	Estudo do Eng. E. Schnoor, P. Frontin e J. Batista	Não oficial
1926	Plano do Eng. Pandiá Calógeras	Não oficial
1934	Plano Geral de Viação Nacional (I PNV)	Dec. 24.497 (29/06/1934)
1937	Plano Nacional de Estradas de Rodagem	Caráter oficial
1944	Planos Rodoviários	Caráter oficial
1947	Plano Nacional de Viação Fluvial	Caráter oficial
1956	Planos Rodoviário e Ferroviário Nacionais	Caráter oficial
1964	II Plano Nacional de Viação	Lei n° 4.592 (29/12/1964)
1973	III Plano Nacional de Viação	Lei n° 5.917 (10/09/1973)

Fontes dos dados primários: MELLO (1975, p. 17-18); MT (1973, p. 9-10).

A partir de 1964, com a instituição do II Plano Nacional de Viação, consolidou-se a idéia de instrumentar o poder público com um dispositivo legal que estabelecesse os princípios gerais e as diretrizes para a concepção e para orientar a implementação de um sistema nacional de transportes unificado, visando a uma coordenação racional entre os sistemas federal, estaduais e municipais, bem assim entre as diferentes modalidades de transportes.

<sup>6</sup> Isto foi determinante para a instituição e sistemática atualização, pelos Estados e Municípios, dos respectivos Planos Rodoviários Estaduais e Municipais que, juntamente com o Plano Rodoviário Federal, definem o elenco de rodovias públicas do Brasil.

Em 1973 foi instituída a terceira versão do Plano Nacional de Viação, que veio a se constituir numa espécie de “Carta Magna” para o setor de transportes, e que deveria, por disposição da própria lei que o instituiu, ser revisto a cada 5 anos<sup>7</sup>.

O PNV vigente definiu o Sistema Nacional de Viação como sendo constituído pelo conjunto dos Sistemas Nacionais Rodoviário, Ferroviário, Portuário, Hidroviário e Aeroviário, compreendendo tanto as infra-estruturas viárias como as estruturas operacionais necessárias ao seu adequado uso<sup>8</sup>.

No que toca ao Sistema Rodoviário Nacional, em particular, o PNV definiu-o como sendo constituído pelos Sistemas Rodoviários Federal, Estaduais e Municipais, e relacionou as rodovias que integram o Sistema Rodoviário Federal, sob jurisdição do DNER<sup>9</sup>.

A lei que instituiu o PNV estabeleceu que os Estados (e os então Territórios), o Distrito Federal e os Municípios reveriam seus planos viários para adequada articulação e compatibilidade, e determinou a elaboração e a implementação dos respectivos Planos Rodoviários obedecendo sistemática semelhante à do Plano Nacional de Viação, sob pena de retenção, pelo DNER, das parcelas de recursos tributários que lhes cabiam (MT, 1973, p. 20-21).

Assim, para não se sujeitarem a retenções de suas quotas-partes do Imposto Único sobre Lubrificantes e Combustíveis Líquidos e Gasosos, os Estados (e Territórios), o Distrito Federal e os Municípios instituíram seus próprios planos rodoviários, complementando o sistema de rodovias públicas do Brasil.

---

<sup>7</sup> Até a data da edição desta publicação, a revisão do III Plano Nacional de Viação ainda não ocorreu, apesar de diversas tentativas de encaminhamento do assunto, por meio de projetos de lei, que continuam em tramitação na Câmara dos Deputados.

<sup>8</sup> Projeto de lei para o novo PNV propõe a definição de um Sistema Nacional de Viação como sendo constituído pelos Subsistemas Rodoviários, Ferroviários, Aquaviários, Dutoviários, Aeroviários e Urbanos.

<sup>9</sup> A relação descritiva das rodovias do Sistema Rodoviário Federal constante da Lei n° 5.917, de 10 set. 1973, foi modificada e atualizada ao longo dos anos por meio de outros dispositivos legais.





## 2 A RODOVIA

A tentação de se superdimensionar as estradas é universal. Às vezes, esse erro é inconsciente. Num país tropical, por exemplo, a prática de se projetar ladeiras (sic) com baixas razões de aclive em regiões de topografia muito acidentada resultou da adoção de padrões norte-americanos que foram originalmente destinados a condições de trânsito sob neve. [...] Mas um erro mais comum, que mesmo os engenheiros de países mais desenvolvidos se sentem tentados a cometer é o de se fazer uma pavimentação de alta qualidade em locais onde uma qualidade um pouco inferior seria mais que suficiente. Esta tendência é reforçada pelo fato de que a maioria dos países em vias de desenvolvimento tende a negligenciar a manutenção e, portanto, constroem estradas de qualidade superior à necessária na suposição de que assim a estrada durará mais tempo. Mas se a manutenção é negligenciada, é muito possível que, devido ao investimento maior, a perda será maior com a estrada de alta qualidade do que seria se a qualidade não fosse tão alta.

WILFRED OWEN. **Estratégia para os transportes**. São Paulo : Livraria Pioneira Editora, 1975 (p. 110-111).

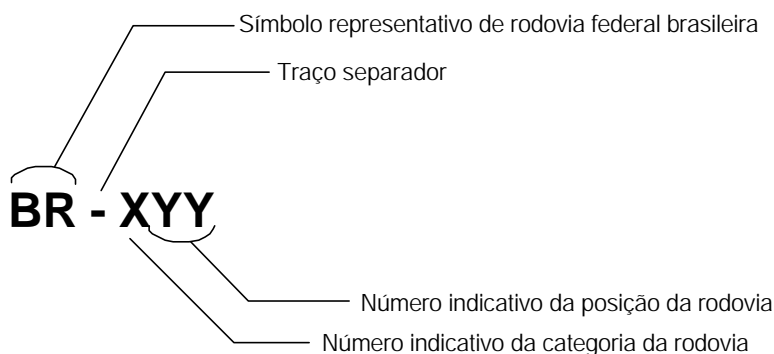
### 2.1 NOMENCLATURA DAS RODOVIAS

Uma das atribuições que o Plano Nacional de Viação reservou ao DNER foi a de fixar critérios para a nomenclatura das rodovias federais, com o objetivo de sistematizar procedimentos para a designação técnica das rodovias.

Para tanto, desde a instituição do II PNV (em 1964), vem sendo adotado no Brasil o critério de localização geográfica para a designação das rodovias federais.

As rodovias federais são designadas por uma sigla, constituída pelo símbolo "BR" (indicativo de qualquer rodovia federal brasileira), seguido de um traço separador, e de um número de três algarismos; o primeiro algarismo indica a categoria da rodovia, e os dois remanescentes indicam a posição da rodovia em relação aos limites geográficos do país e em relação a Brasília, a capital federal.

FIGURA 2.1 – SIGLA PARA AS RODOVIAS FEDERAIS



Para fins de nomenclatura das rodovias federais foram consideradas 5 categorias de rodovias, de acordo com as disposições gerais dos traçados (vide figura 2.2):

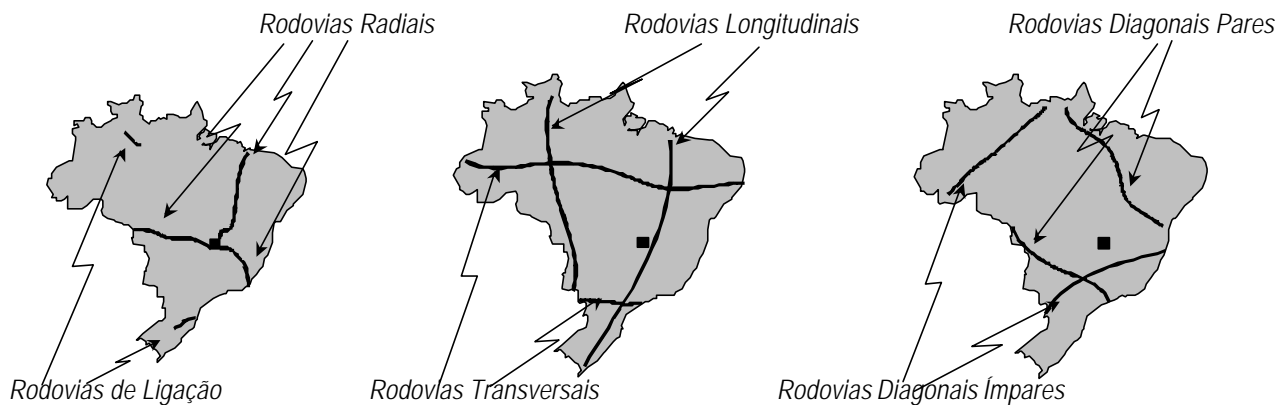
- *Rodovias Radiais*, abrangendo as rodovias cujos traçados têm uma extremidade em Brasília, a capital federal, e outra extremidade noutro ponto importante do país;
- *Rodovias Longitudinais*, compreendendo as rodovias cujos traçados se desenvolvem segundo a direção geral Norte – Sul;
- *Rodovias Transversais*, compreendendo as rodovias cujos traçados se desenvolvem segundo a direção geral Leste – Oeste;

- *Rodovias Diagonais*, envolvendo as rodovias cujos traçados se desenvolvem segundo as direções gerais Noroeste – Sudeste (chamadas de *Rodovias Diagonais Pares*) e Nordeste – Sudoeste (chamadas de *Rodovias Diagonais Ímpares*);
- *Rodovias de Ligação*, categoria que incorpora as rodovias que não se enquadram nas categorias anteriores.

O primeiro algarismo da sigla de uma rodovia federal, conforme já citado, indica a categoria a que pertence a rodovia, de acordo com o seguinte critério:

- 1º algarismo = 0 (zero) para as Rodovias Radiais;
- 1º algarismo = 1 para as Rodovias Longitudinais;
- 1º algarismo = 2 para as Rodovias Transversais;
- 1º algarismo = 3 para as Rodovias Diagonais;
- 1º algarismo = 4 para as Rodovias de Ligação.

FIGURA 2.2 – CATEGORIAS DE RODOVIAS FEDERAIS



O número formado pelos dois últimos algarismos é estabelecido de acordo com a posição relativa do traçado da rodovia, dentro de cada categoria específica, permitindo uma noção aproximada da posição da rodovia em relação ao mapa do país e em relação à capital federal, observados os seguintes critérios:

- para as Rodovias Radiais, o número pode variar de 10 a 90, à razão de 10 em 10, sendo estabelecido proporcionalmente ao azimute aproximado do traçado da rodovia;
- para as Rodovias Longitudinais, o número pode variar de 01 a 99, crescendo de Leste para Oeste, tomando-se Brasília como referência para o número intermediário 50;
- para as Rodovias Transversais, o número pode variar de 01 a 99, crescendo de Norte para o Sul, tomando-se Brasília como referência para o número intermediário 50;
- para as Rodovias Diagonais Pares, o número deve ser necessariamente par, podendo variar de 02 a 98, crescendo de Nordeste para Sudoeste, tomando-se Brasília como referência para o número intermediário 50;
- para as Rodovias Diagonais Ímpares, o número deve ser necessariamente ímpar, podendo variar de 01 a 99, crescendo de Noroeste para Sudeste, tomando-se Brasília como referência para o número intermediário 51;
- para as Rodovias de Ligação, o número pode variar de 01 a 99, reservando-se a numeração inferior a 50 para as rodovias situadas ao Norte do paralelo que passa em Brasília, e a numeração superior a 50 para as rodovias situadas ao Sul do paralelo que passa em Brasília; em princípio, a numeração deve ser crescente de Norte para o Sul.

O critério adotado para a nomenclatura das rodovias federais acabou sendo adotado pelos Estados<sup>10</sup> e pelos Municípios, que elaboraram seus Planos Rodoviários obedecendo à sistemática preconizada pelo Plano Nacional de Viação.

No caso das rodovias federais, a nomenclatura segundo o critério de localização geográfica tem sentido lógico, pois qualquer cidadão razoavelmente instruído é capaz de mentalizar uma figura bastante próxima da disposição de uma rodovia federal (e, portanto, de sua localização) em relação ao mapa do país, pois certamente conhece a imagem do mapa do Brasil e a localização aproximada de sua capital federal.

O mesmo, no entanto, não se pode afirmar com relação aos Estados (e ao Distrito Federal), e menos ainda com relação aos Municípios. Bastaria, para justificar essa linha de argumentação, que o leitor se detivesse a imaginar as disposições dos mapas dos diferentes Estados com as localizações das respectivas capitais; se tanto não bastasse, poderia o leitor passar então para o caso dos Municípios...

É fácil perceber que o critério de localização geográfica, que tem seus méritos quando adotado para a nomenclatura das rodovias federais, perde sua consistência e utilidade quando empregado para a designação das rodovias estaduais ou municipais.

## 2.2 CLASSIFICAÇÃO FUNCIONAL DE RODOVIAS

O conhecimento da sigla de uma rodovia federal permite, como já visto, que se tenha uma noção razoavelmente aproximada da disposição do traçado da rodovia em relação ao mapa do Brasil.

Assim, tomando como exemplo os casos das rodovias federais BR-101 e BR-285, que têm partes de seus traçados no território do Estado de Santa Catarina, pode-se de imediato afirmar, só com base nas designações dessas rodovias, que a BR-101 se desenvolve no sentido Norte – Sul, junto ao limite oriental do território, próximo à linha de costa do Estado, e que a BR-285 se desenvolve no sentido geral Leste – Oeste, na região Sul do Estado (esta última afirmação depende do conhecimento da posição da rodovia em relação aos traçados de outras rodovias transversais).

A nomenclatura das rodovias não fornece, no entanto, outras informações úteis, tais como indicadores de sua razão de existir ou de sua importância no contexto da infra-estrutura de transporte rodoviário do Estado, da região ou do país.

Para tanto, há outra forma de classificar as rodovias, não importando suas localizações ou disposições geográficas, mas sim o *tipo de serviço* que elas oferecem.

Essa forma de classificação das rodovias, denominada de *Classificação Funcional*, parte do reconhecimento de que o tipo de serviço oferecido por uma rodovia pode ser determinado a partir das funções básicas de *mobilidade* e de *acessibilidade* que a rodovia propicia.

Na realização de uma viagem típica, são geralmente utilizadas, no início e no final do percurso, rodovias de pequeno porte, que proporcionam acesso aos locais de origem e de destino; para a realização do percurso em si, no entanto, principalmente quando este é longo, são utilizadas rodovias de grande porte, que proporcionam elevada mobilidade.

Interfaceando esses extremos, entre as rodovias que oferecem maiores facilidades de acesso e as que propiciam elevados níveis de mobilidade, são utilizadas, nas porções intermediárias do percurso, rodovias que oferecem uma combinação de possibilidades, tanto de mobilidade como de acesso.

---

<sup>10</sup> O Estado de São Paulo constituiu uma exceção, tendo adotado (Decreto nº 51.629, de 2 abr. 1969) classificação e codificação diferenciadas, sendo as rodovias classificadas em (i) *radiais*, quando se irradiam da capital, codificadas com numeração par, de 3 dígitos, indicando o azimute aproximado do traçado; (ii) *transversais*, quando circundam a capital, com numeração ímpar, de 3 dígitos, indicando a distância média em km do traçado da rodovia à capital; e (iii) *de acesso*, codificadas com dois números de 3 dígitos, separados por uma barra – o primeiro, indicando o km da rodovia de origem, à qual se entronca, e o segundo, o número dessa mesma rodovia.

A consideração dessas funções de mobilidade e de acesso forma a base conceitual a partir da qual as rodovias podem ser agrupadas hierarquicamente nos seguintes *Sistemas Funcionais*, de acordo com as características básicas dos serviços oferecidos (vide ilustração da figura 2.3):

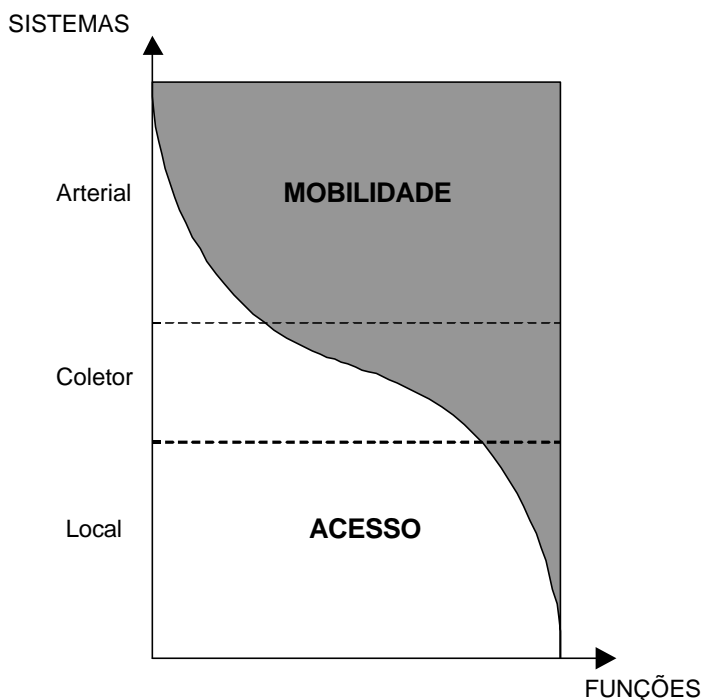
- *Sistema Arterial*, que compreende as rodovias cuja função principal é a de propiciar mobilidade;
- *Sistema Coletor*, englobando as rodovias que proporcionam um misto de funções de mobilidade e de acesso;
- *Sistema Local*, abrangendo as rodovias cuja função principal é a de oferecer oportunidades de acesso.

Para fins de classificação funcional, são ainda considerados dois outros conceitos – o de *extensão de viagem* e o de *rendimentos decrescentes* – que permitem distinguir melhor as rodovias quanto às funções que elas oferecem, possibilitando a subdivisão dos sistemas funcionais Arterial e Coletor em classes mais específicas.

O conceito de *extensão de viagem* diz respeito ao fato de que viagens longas estão em geral associadas a níveis crescentes de mobilidade e a menores possibilidades de acesso. Assim, a maioria das viagens longas demanda rodovias do Sistema Arterial, que oferecem grande mobilidade; no outro extremo, a maioria das viagens curtas demanda rodovias do Sistema Local, de baixa mobilidade, mas com elevadas possibilidades de acesso.

O conceito de *rendimentos decrescentes* está relacionado à constatação de que, num sistema de rodovias, a exemplo do que se verifica em qualquer rede física que dê suporte à circulação de fluxos, as maiores quantidades desses fluxos ocorrem em uma parcela pequena da extensão da rede, ao passo que uma grande parte da extensão física da rede atende a fluxos muito pequenos<sup>11</sup>.

FIGURA 2.3 – RELAÇÃO ENTRE AS FUNÇÕES DE MOBILIDADE E DE ACESSO



Fonte: Classificação funcional do sistema rodoviário do Brasil (DNER, 1974, p.12)

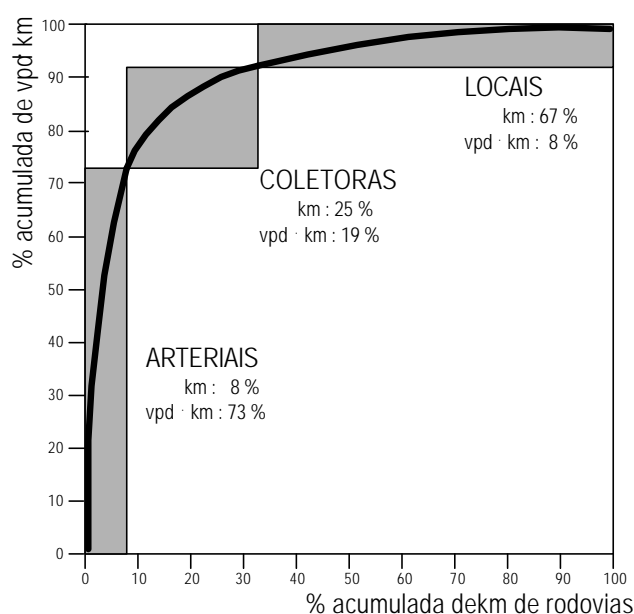
<sup>11</sup> Para fins de estudos de classificação funcional, os fluxos na rede rodoviária são expressos em volumes diários x quilômetros (vpd.km), obtidos, para cada trecho homogêneo de rodovia, pelo produto do volume médio diário de tráfego nesse trecho pela extensão do mesmo, em km.

A consideração desses dois conceitos, na análise de uma rede de rodovias que serve a um país (ou mesmo a uma grande região), permite que sejam caracterizadas as rodovias mais adequadas para cada padrão de *extensão de viagem* e, uma vez quantificados os respectivos trechos homogêneos e fluxos, permite também a construção da curva de *rendimentos decrescentes*, com a definição dos parâmetros identificadores dos limites de cada sistema funcional.

No gráfico da figura 2.4, está ilustrada a curva de rendimentos decrescentes resultante dos estudos de classificação funcional de rodovias realizados pelo DNER, abrangendo a rede de rodovias em operação no Brasil em 1973.

O exame deste gráfico permite que se observe com clareza as citadas características de funcionamento de uma rede de rodovias.

FIGURA 2.4 – CURVA DE RENDIMENTOS DECRESCENTES



Fonte: Classificação funcional do sistema rodoviário do Brasil (DNER, 1974, p.15)

Percebe-se que o Sistema Arterial, servindo aos grandes geradores de tráfego e ao trânsito de longo curso demandando elevados níveis de mobilidade, atende à maior percentagem dos vpd-km do sistema, mas compreende uma percentagem relativamente pequena da extensão total de rodovias.

Na outra ponta, o Sistema Local, servindo aos pequenos geradores de tráfego e ao trânsito de curto percurso demandando maiores possibilidades de acessos e baixos níveis de mobilidade, atende a uma pequena percentagem dos vpd-km do sistema, mas abrange uma percentagem bastante elevada da extensão total da rede.

Entre esses extremos situa-se o Sistema Coletor, no qual se verifica um relativo equilíbrio entre as percentagens de extensão de rede compreendidas pelo sistema e de vpd-km atendidos.

Dentre os objetivos gerais da adoção da classificação funcional de rodovias podem ser citados:

- o planejamento lógico do desenvolvimento físico do sistema rodoviário;
- a adjudicação racional da responsabilidade de jurisdição;
- o planejamento da distribuição dos recursos financeiros por sistemas funcionais.

Na tabela 2.1 estão resumidos, por sistema funcional, as funções básicas e os demais parâmetros que serviram de referência para a classificação funcional das rodovias no Brasil.

TABELA 2.1 – PARÂMETROS PARA A CLASSIFICAÇÃO FUNCIONAL DE RODOVIAS

SISTEMAS FUNCIONAIS		FUNÇÕES BÁSICAS	PARÂMETROS DE REFERÊNCIA
ARTERIAL	<b>PRINCIPAL</b>	Viagens internacionais e inter-regionais. Elevados níveis de mobilidade. Formar sistema contínuo na região. Articulação com rodovias similares em regiões vizinhas. Conectar capitais e cidades com pop. > 150.000 hab.	Extensão: 2 a 3% da rede. Serviço: 30 a 35 % dos vpd.km. Ext. média de viagens: 120 km. Veloc. operação: 60 a 120 km/h.
	<b>PRIMÁRIO</b>	Viagens inter-regionais e interestaduais. Atender função essencial de mobilidade. Formar sistema contínuo na região. Conectar cidades com pop. ± 50.000 hab.	Extensão: 1½ a 3% da rede. Serviço: 15 a 20 % dos vpd.km. Ext. média de viagens: 80 km. Veloc. operação: 50 a 100 km/h.
	<b>SECUNDÁRIO</b>	Viagens intra-estaduais e não servidas pelos sistemas superiores. Formar sistema contínuo com rodovias dos sistemas superiores, atendendo função essencial de mobilidade. Conectar cidades com pop. > 10.000 hab.	Extensão: 2½ a 5 % da rede. Serviço: 10 a 20 % dos vpd.km. Ext. média de viagens: 60 km. Veloc. operação: 40 a 80 km/h.
COLETOR	<b>PRIMÁRIO</b>	Viagens intermunicipais. Acesso a geradores de tráfego (portos, mineração, parques turísticos, produção agrícola, etc.). Conectar cidades com pop. > 5.000 hab.	Extensão: 4 a 8 % da rede. Serviço: 8 a 10 % dos vpd.km. Ext. média de viagens: 50 km. Veloc. operação: 30 a 70 km/h.
	<b>SECUNDÁRIO</b>	Ligar áreas servidas com o sistema coletor primário ou com o sistema arterial. Acesso a grandes áreas de baixa densidade populacional. Conectar centros com pop. > 2.000 hab e sedes municipais não servidas por sistemas superiores.	Extensão: 10 a 15 % da rede. Serviço: 7 a 10 % dos vpd.km. Ext. média de viagens: 35 km. Veloc. operação: 30 a 60 km/h.
<b>LOCAL</b>		Viagens intra-municipais. Acesso de pequenas localidades e áreas rurais às rodovias de sistemas superiores.	Extensão: 65 a 80 % da rede. Serviço: 5 a 30 % dos vpd.km. Ext. média de viagens: 20 km. Veloc. operação: 20 a 50 km/h.

Fonte dos dados primários: Manual de projeto geométrico de rodovias rurais (DNER, 1999, p. 17-19).

### 2.3 CLASSIFICAÇÃO TÉCNICA DAS RODOVIAS

A nomenclatura das rodovias federais oferece uma forma lógica para a designação das rodovias, atendendo a interesses de ordem administrativa, permitindo ainda (ao menos para o caso das rodovias federais) que se tenha uma noção aproximada da disposição do traçado de uma rodovia ao se conhecer a sua sigla.

A classificação funcional das rodovias, por sua vez, atende principalmente a interesses da área de planejamento rodoviário, pois o critério de agrupamento de acordo com os tipos de serviço prestados permite que se tenha uma noção da importância que uma rodovia exerce no contexto de uma rede rodoviária e das características gerais da demanda que a solicita, quando se conhece o sistema funcional a que pertence a rodovia.

Para fins de balizamento do projeto geométrico de uma rodovia, no entanto, é conveniente outra forma de classificação, denominada de *Classificação Técnica*, que permite a definição das dimensões e da configuração espacial com que a rodovia deverá ser projetada para poder atender satisfatoriamente à demanda que a solicitará e, conseqüentemente, às funções a que se destina.

Há diferentes formas de se classificar tecnicamente uma rodovia ou um projeto. Cada país ou entidade responsável pela administração pública de rodovias pode estabelecer suas próprias normas, ou adaptar às suas circunstâncias as normas e critérios observados em outros países.

É o caso brasileiro, em que as normas de projeto geométrico editadas pelo DNER foram copiadas e adaptadas a partir das normas de projeto praticadas nos Estados Unidos<sup>12</sup>.

Nesta publicação, serão referenciadas apenas as normas editadas e recomendadas pelo DNER, que são as praticadas no Brasil<sup>13</sup>.

As primeiras normas de projeto editadas pelo DNER foram as “Normas para o projeto de estradas de rodagem”, instituídas formalmente pelas Portarias n° 19, de 10 jan. 1949, e n° 348, de 17 abr. 1950.

Posteriormente, essas normas foram complementadas e atualizadas por meio de publicações diversas, com destaque do “Manual de projeto de engenharia rodoviária” (DNER, 1974), das “Normas para o projeto de estradas de rodagem” (DNER, 1975), e das “Instruções para o projeto geométrico de rodovias rurais” (DNER, 1979).

Mais recentemente, o DNER lançou o “Manual de projeto geométrico de rodovias rurais” (DNER, 1999), aprovado pelo Conselho Administrativo do DNER em 21 dez. 1999, por meio da Resolução n° 15/99, com o objetivo de reunir as informações essenciais pertinentes às normas para o projeto geométrico de rodovias rurais em vigor no Brasil, incluindo recomendações sobre aspectos não normatizados.

### 2.3.1 Designação dos elementos geométricos

Uma rodovia pode ser imaginada como sendo um ente físico, no qual prevalecem as dimensões longitudinais, sendo seus elementos referenciados geometricamente a uma linha fluente e contínua.

Assim, como qualquer entidade física tridimensional, uma rodovia pode ter seus elementos geométricos decompostos segundo 3 dimensões, para tratamento em fases separadas, visando maior facilidade.

Numa das fases, trata-se do projeto em planta, dimensionando-se os elementos geométricos da rodovia projetados em um plano horizontal. No projeto em planta, o objetivo principal é definir a geometria da linha que representa a rodovia, denominada de *eixo da rodovia*.

Noutra fase, define-se o projeto em perfil, com o dimensionamento dos elementos geométricos da rodovia segundo um plano vertical; atente-se para o fato de que não se trata de uma *projeção vertical* propriamente dita, pois o plano vertical de referência para fins de projeto é obtido pelo rebatimento da superfície cilíndrica gerada por uma reta que se desloca ao longo do eixo da rodovia, perpendicularmente ao plano horizontal. No projeto em perfil, o objetivo principal é definir a geometria da linha que corresponde ao eixo da rodovia representado no plano vertical, linha esta que é denominada *greide da rodovia* (ou *grade*, do original em inglês).

Finalmente, na terceira fase, pode-se definir os denominados *elementos de seção transversal*, com a caracterização da geometria dos componentes da rodovia segundo planos verticais perpendiculares ao eixo da rodovia.

É claro que esta separação é feita apenas com o propósito de facilitar o dimensionamento dos elementos que constituem o projeto geométrico de uma rodovia. Sendo a rodovia, como já dito, uma entidade física tridimensional, assim deve ser sempre imaginada e tratada, com seus elementos constituintes, embora definidos em planos separados, sendo pensados em conjunto, para que seus efeitos espaciais e dinâmicos resultem devidamente considerados.

Para uniformização e facilidade de referência, apresenta-se, com base nas figuras 2.5 a 2.7, a denominação técnica dos principais elementos constituintes de uma rodovia, com destaque para aqueles de maior interesse para o projeto geométrico.

<sup>12</sup> Nos Estados Unidos não se faz referência a “normas para o projeto”, como as praticamos no Brasil, mas a “políticas para o projeto”.

<sup>13</sup> Há exceções, como no caso do Estado de Santa Catarina, onde o DER/SC resolveu adotar normas alemãs para o projeto geométrico de rodovias.

Observando-se as diferentes disposições comumente encontradas ao longo dos traçados das rodovias, podem ser distinguidos 3 tipos clássicos de configuração para as denominadas *seções transversais*, que estão ilustradas esquematicamente na figura 2.5, quais sejam:

- seção transversal de corte: aquela que corresponde à situação em que a rodovia resulta abaixo da superfície do terreno natural;
- seção transversal de aterro: a que corresponde à situação contrária, isto é, com a rodovia resultando acima do terreno natural;
- seção transversal mista: que ocorre quando, na mesma seção, a rodovia resulta de um lado, abaixo do terreno natural, e do outro, acima do terreno natural.

Na figura 2.6 está representada a configuração típica de uma seção transversal mista de uma rodovia em pista simples, onde de um lado estão assinalados os elementos característicos de uma seção de corte, e do outro lado, os elementos característicos de uma seção de aterro.

A mesma disposição está representada na figura 2.7, onde se representa uma seção transversal mista para o caso de uma rodovia em pista dupla, com indicação das posições dos eixos de projeto (os eixos podem ser projetados de forma independente).

Nessas figuras, estão assinalados os seguintes elementos básicos:

- *eixo da rodovia*: é a linha que representa geometricamente a rodovia, projetada no plano horizontal; em uma seção transversal, o eixo se resume a um ponto, tal como indicado nas figuras;
- *faixa de rolamento* (ou *faixa de trânsito*): é o espaço dimensionado e destinado à passagem de um veículo por vez; na figura 2.6 está representado o caso mais simples, de rodovia com 2 faixas de trânsito, uma para cada sentido de percurso, e na figura 2.7 representa-se o caso de rodovia com pista dupla, com 2 faixas de trânsito por sentido;
- *pista de rolamento*: é o espaço correspondente ao conjunto das faixas contíguas; na figura 2.6 representa-se o caso de pista simples, e na figura 2.7 o caso de pista dupla, com separação física entre as pistas;
- *acostamento*: é o espaço adjacente à faixa de trânsito que é destinado à parada emergencial de veículos, não sendo em geral dimensionado para suportar o trânsito de veículos (que pode ocorrer em caráter esporádico); nas seções em aterro, os acostamentos externos poderão incluir uma largura adicional (não utilizável pelos veículos) destinada à instalação de dispositivos de sinalização (placas) ou de segurança (*guard-rails*); nos casos de pistas duplas, o acostamento adjacente à faixa de trânsito mais à direita de uma pista, em cada sentido de percurso (faixa externa), é denominado *acostamento externo*, e o adjacente à faixa mais à esquerda, em cada sentido de percurso (faixa interna) é denominado *acostamento interno* (observe-se que os acostamentos são também dotados de inclinações transversais, com o objetivo de permitir o escoamento das águas de superfície para fora da pista<sup>14</sup>);
- *sarjeta*: dispositivo de drenagem superficial, nas seções de corte, que tem por objetivo coletar as águas de superfície, conduzindo-as longitudinalmente para fora do corte;
- *abaulamento*: é a inclinação transversal das faixas de trânsito (ou da pista), introduzida com o objetivo de forçar o escoamento das águas de superfície para fora da pista; no caso de pista dupla, não se trata de abaulamento propriamente dito, mas de inclinações transversais das pistas (que podem ser independentes);

---

<sup>14</sup> Há situações em que a norma permite que a inclinação do acostamento do lado externo da curva seja inclinado no mesmo sentido que a pista, conforme se verá adiante, com a finalidade de melhorar as condições de segurança para os veículos que "se perdem" nas curvas, em troca de maior contribuição de águas pluviais a serem escoadas pela pista de rolamento.



FIGURA 2.5 - CONFIGURAÇÕES TÍPICAS DE SEÇÕES TRANSVERSAIS

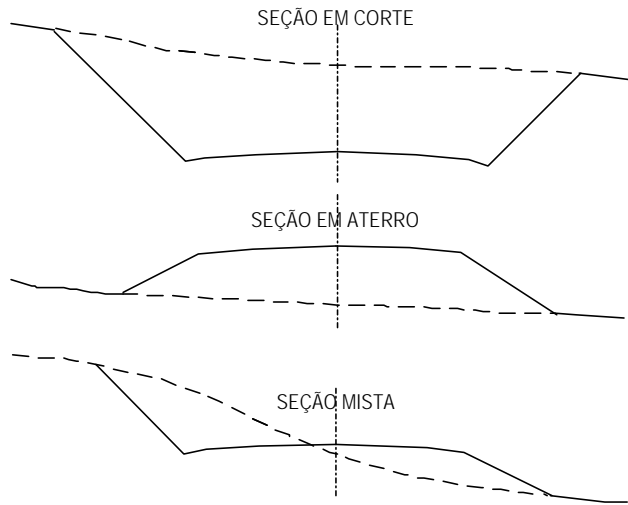


FIGURA 2.6 - ELEMENTOS DE SEÇÃO TRANSVERSAL RODOVIAS EM PISTA SIMPLES

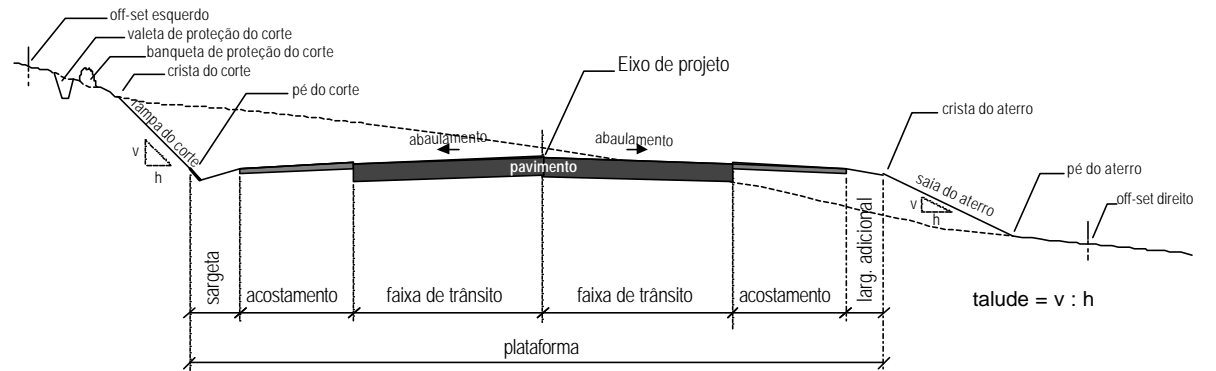
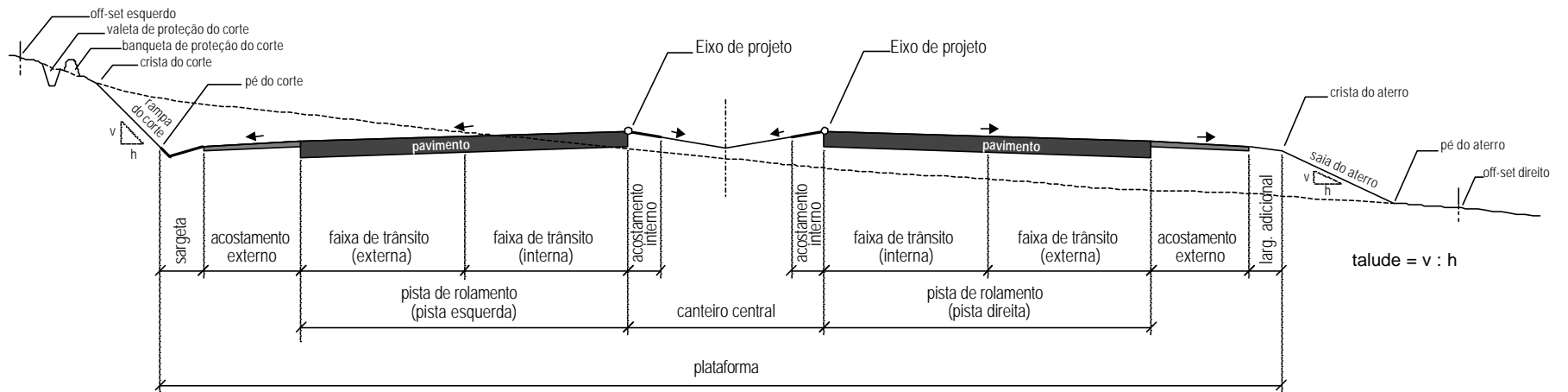


FIGURA 2.7 - ELEMENTOS DE SEÇÃO TRANSVERSAL RODOVIAS EM PISTA DUPLA



- *plataforma*: a porção da rodovia compreendida entre os bordos dos acostamentos externos, mais as larguras das sarjetas e/ou as larguras adicionais, conforme se trate de seções de corte, de aterro ou mistas;
- *saia do aterro*: a superfície lateral (geralmente inclinada) que resulta da conformação de uma seção de aterro; a interseção dessa superfície com o terreno natural é denominada de *pé do aterro*, sendo a interseção com a plataforma denominada *crista do aterro*;
- *rampa do corte*: a superfície lateral (geralmente inclinada) que resulta da conformação de uma seção de corte; a interseção dessa superfície com a plataforma é denominada de *pé do corte*, sendo a interseção com o terreno natural denominado *crista do corte*;
- *talude*: a forma de caracterizar a inclinação da saia do aterro ou da rampa do corte, sendo expresso pela relação  $v : h$  (ou  $v/h$ ) entre os catetos vertical ( $v$ ) e horizontal ( $h$ ) de um triângulo retângulo cuja hipotenusa coincide com a superfície inclinada (matematicamente, o talude expressa a tangente do ângulo que a superfície inclinada forma com o horizonte);
- *valeta de proteção de corte*: dispositivo de drenagem superficial, disposto a montante das seções de corte, que tem por objetivo interceptar as águas superficiais que correm em direção à rampa do corte, conduzindo -as longitudinalmente para fora das seções de corte; geralmente são pequenas valas simplesmente cavadas no terreno natural, sendo o material resultante da escavação depositado a jusante da valeta, constituindo um pequeno dique, denominado *banqueta de proteção do corte*, cuja função é a de servir como barreira para prevenção quanto a eventuais extravasamentos da valeta;
- *off-sets*: dispositivos (geralmente varas ou estacas) que servem para referenciar a posição das marcas físicas correspondentes às cristas dos cortes ou dos pés dos aterros, colocados em pontos afastados por uma distância fixa convencional (daí a denominação, do original em inglês, que designa tal afastamento), com o objetivo de facilitar a reposição das marcas, se arrancadas durante a construção dos cortes ou dos aterros.

Observe-se, a partir da definição desses elementos, que uma rodovia pode apresentar diferentes larguras de plataforma ao longo de sua extensão, dependendo das conformações das seções de aterro, de corte ou mistas, devido à inclusão das larguras das sarjetas nos cortes e/ou das larguras adicionais dos acostamentos externos nos aterros.

A terminologia acima apresentada é a tecnicamente correta; no entanto, no jargão rodoviário, alguns elementos passaram a ser designados com a denominação de outros, gerando uma certa incorreção do ponto de vista de conceituação, no rigor acadêmico.

É o caso das saias dos aterros e das rampas de cortes, que são usualmente designadas por "taludes dos aterros" e por "taludes dos cortes", respectivamente. Como já visto, o termo *talude* não se refere à superfície propriamente dita, mas à sua inclinação; no entanto, é comum esse tipo de denominação abrangente, como sugere a própria normatização (DNER, 1979, p. 12).

Outra impropriedade comumente verificada no meio rodoviário é o uso dos termos "off-set do aterro" e "off-set do corte" para designar, respectivamente, o pé do aterro e a crista do corte.

### 2.3.2 Principais características técnicas de projeto

A classificação técnica de uma rodovia (ou do projeto de uma rodovia) é feita, segundo os critérios estabelecidos pelo DNER, com base em dois parâmetros principais: o *volume de tráfego* a ser atendido pela rodovia, e o *relevo* da região atravessada.

O volume de tráfego em uma seção ou em um trecho de uma rodovia é, por definição, o número de veículos que passa pela seção ou pelo trecho em um dado intervalo de tempo, sendo a grandeza que expressa a demanda que solicita a rodovia.

O volume de tráfego pode se referir ao conjunto dos diferentes tipos (ou *categorias*) de veículos ou a cada categoria em particular, podendo também ser expresso em diferentes unidades, dependendo dos intervalos de tempo fixados.

Para fins de classificação técnica de projetos rodoviários, considera-se o conjunto dos diferentes tipos de veículos, tratando-se, portanto, de *volumes de tráfego misto*; os intervalos de tempo mais utilizados para fins de projeto geométrico são o dia e a hora, resultando em volumes de tráfego expressos em veículos/dia (*v/d* ou *vpd*) ou em veículos/hora (*v/h* ou *vph*).

Assim, as normas do DNER estabelecem diferentes *classes de projeto*, com características adequadas ao atendimento dos volumes de tráfego previstos para as rodovias.

Para cada classe de projeto, as normas estabelecem a *velocidade diretriz* mínima recomendada para o projeto da rodovia, em função do relevo da região atravessada.

A velocidade diretriz é, por definição, a maior velocidade com que um trecho de rodovia pode ser percorrido, com segurança, considerando apenas as limitações impostas pelas características geométricas da rodovia; a velocidade diretriz é a velocidade selecionada para fins de projeto.

Observe-se que o relevo da região, embora não seja uma característica intrínseca da rodovia propriamente dita, é também considerado para fins de sua classificação técnica.

Isto se deve não somente aos diferentes graus de dificuldade (e, por via de consequência, aos diferentes custos) para o projeto e construção de rodovias com características similares em regiões de relevos diferenciados, mas também ao fato de que os usuários aceitam, com o mesmo grau de satisfação, transitar em rodovias com geometrias mais pobres (portanto, com menores velocidades diretrizes), ao perceber condições de relevo mais difíceis, e vice-versa.

Não há critérios rígidos e objetivos para estabelecer quando uma determinada região apresenta relevo plano, ondulado ou montanhoso, sendo essa definição geralmente feita de modo subjetivo pelo projetista, com base em sua experiência e na percepção da geomorfologia das áreas atingidas pelo traçado da rodovia.

A AASHTO<sup>15</sup> sugere a classificação do relevo do terreno, nos corredores por onde passa a rodovia, de acordo com a influência que esse relevo exerce na conformação das características do traçado resultante do projeto da rodovia, definindo (AASHTO, 1994, p. 236):

- relevo plano: a condição em que as distâncias de visibilidade permitidas pela geometria da rodovia podem resultar bastante longas sem que para isso se incorra em maiores dificuldades construtivas ou custos mais elevados;
- relevo ondulado: aquele em que as declividades do terreno natural passam a exigir constantes cortes e aterros para a conformação do perfil da rodovia, com ocasionais inclinações mais acentuadas oferecendo alguma restrição ao desenvolvimento normal dos alinhamentos horizontais e verticais;
- relevo montanhoso: o que se caracteriza por mudanças abruptas de elevações entre o terreno natural e a plataforma da rodovia, tanto longitudinal quanto transversalmente, demandando freqüentes aterros e cortes nas encostas para se conformar a geometria horizontal e vertical da rodovia.

Uma vez estabelecida a classe de projeto e definida a velocidade diretriz, em função do relevo da região (ou, mais apropriadamente, do corredor) por onde passa a rodovia, esta velocidade passa a condicionar, direta ou indiretamente, a fixação dos limites a serem observados pelas demais características técnicas com as quais a rodovia será geometricamente projetada.

Dentre essas características técnicas, que serão objeto de consideração mais detalhada à medida que os assuntos específicos venham a ser tratados nesta publicação, destacam-se as seguintes, cujos valores limites são especificamente fixados pelas Normas do DNER para as diferentes classes de projeto:

---

<sup>15</sup> AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*) é a entidade Norte-Americana que congrega os órgãos públicos estaduais rodoviários e de transportes daquele país, e que se encarrega de formular e recomendar políticas de engenharia rodoviária.

- *Distância de Visibilidade de Parada*: a distância que um veículo percorre, desde a percepção de um obstáculo, pelo motorista, até a parada total do veículo;
- *Distância de Visibilidade de Ultrapassagem*: a distância livre necessária entre um veículo, que deseja ultrapassar outro mais lento à sua frente, e um veículo que esteja se deslocando em sentido contrário (em rodovia de pista simples), para que a manobra possa ser completada com segurança;
- *Raio de Curva Horizontal*: o raio de curva circular utilizada no projeto em planta;
- *Superelevação*: a inclinação transversal da pista (geralmente expressa em %), nos trechos em curva horizontal, que serve para contrabalançar o efeito da força centrífuga;
- *Rampa (aclive ou declive)*: a inclinação longitudinal dos trechos retos do greide, no projeto em perfil (geralmente expressa em %);
- *Parâmetro K*: o parâmetro que caracteriza uma parábola do 2º grau (curva utilizada no projeto em perfil), sendo seu valor dado pelo quociente entre o comprimento da parábola e a variação de rampas nos seus extremos, ou seja:  $K = L / \Delta i$  (em m/%);
- *Largura da Faixa de Trânsito*: a largura com que devem ser projetadas as faixas de trânsito, que devem comportar os veículos com alguma folga lateral, para permitir pequenos desvios de trajetória;
- *Largura do Acostamento*: a largura com que devem ser projetados os acostamentos para que estes possam atender às suas finalidades, influenciando nas condições oferecidas ao trânsito na rodovia;
- *Gabarito Vertical*: a altura livre, acima da superfície da pista de rolamento, que deve ser observada ao longo de toda a extensão do trecho projetado, para assegurar a passagem dos veículos nela autorizados a transitar;
- *Afastamento Lateral do Bordo*: a distância livre existente entre o bordo da faixa de trânsito ou da porção transitável do acostamento e um obstáculo físico;
- *Largura do Canteiro Central*: a largura do espaço (ou do dispositivo de separação física) das pistas, no caso de pista dupla, medido entre os bordos das faixas internas, incluindo, por definição, as larguras dos acostamentos internos.

### 2.3.3 Classes de projetos

As normas do DNER estabelecem 5 classes técnicas para o projeto de rodovias rurais integrantes da rede nacional, quais sejam:

- *Classe 0 (zero) ou Especial*, que corresponde ao melhor padrão técnico, com características técnicas mais exigentes, sendo sua adoção feita por critérios de ordem administrativa; trata-se de projeto de rodovia em pista dupla, com separação física entre as pistas, interseções em níveis distintos e controle total de acessos, com características de *Via Expressa*;
- *Classe I (um)*, que é subdividida nas classes IA e IB; a Classe IA corresponde a projeto de rodovia com pista dupla, admitindo interseções no mesmo nível e com controle parcial de acessos, sendo a definição por esta classe feita com base em estudos de capacidade de rodovias; a Classe IB corresponde a projeto de rodovia em pista simples, sendo indicada para os casos em que a demanda a atender é superior a 200 vph ou superior a 1.400 vpd, mas não suficiente para justificar a adoção de classes de projeto superiores;
- *Classe II (dois)*, que corresponde a projeto de rodovia em pista simples, cuja adoção é recomendada quando a demanda a atender é de 700 vpd a 1.400 vpd;
- *Classe III (três)*, que corresponde a projeto de rodovia em pista simples, sendo recomendada para o projeto de rodovias com demanda entre 300 vpd e 700 vpd;

- *Classe IV* (quatro), que é a classe de projeto mais pobre, correspondendo a projeto de rodovia em pista simples, sendo subdividida nas classes IVA e IVB; a Classe IVA tem sua adoção recomendada para os casos em que a demanda, na data de abertura da rodovia ao tráfego, situa-se entre 50 vpd e 200 vpd, sendo a Classe IVB reservada aos casos em que essa demanda resulte inferior a 50 vpd.

As classes de projeto, os respectivos critérios de classificação técnica e as velocidades diretrizes recomendadas para o projeto de rodovias novas, para as diferentes condições de relevo da região atravessada, estão resumidos na tabela 2.2.

TABELA 2.2 – CLASSES DE PROJETO PARA NOVOS TRAÇADOS DE RODOVIAS EM ÁREAS RURAIS - DNER

CLASSES DE PROJETO	CARACTERÍSTICAS	CRITÉRIO DE CLASSIFICAÇÃO TÉCNICA <sup>(1)</sup>	VELOCIDADE DE PROJETO (km/h)		
			Plano	Ondulado	Montanhoso
<b>0</b>	Via Expressa (Controle Total de Acessos)	Decisão Administrativa.	120	100	80
<b>I</b>	<b>A</b> Pista Dupla (Controle Parcial de Acessos)	O projeto em pista simples resultaria em Níveis de Serviço inferiores ao aceitável <sup>(2)</sup> .	100	80	60
	<b>B</b> Pista Simples	Volume de Tráfego projetado: > 200 vph ou > 1.400 vpd.			
<b>II</b>	Pista Simples	Volume de Tráfego projetado: 700 vpd a 1.400 vpd.	100	70	50
<b>III</b>	Pista Simples	Volume de Tráfego projetado: 300 vpd a 700 vpd.	80	60	40
<b>IV</b>	<b>A</b> Pista Simples	Tráfego na data de abertura: 50 vpd a 200 vpd.	60	40	30
	<b>B</b> Pista Simples	Tráfego na data de abertura: < 50 vpd.			

OBSERVAÇÕES: <sup>(1)</sup> Os Volumes de Tráfego indicados são bidirecionais e referem-se a veículos mistos; os volumes projetados são os previstos para o fim dos dez primeiros anos de operação da via.

<sup>(2)</sup> Conceito e critérios para o Nível de Serviço: vide o "Highway capacity manual" (TRB, 1994).

Os valores limites e recomendados para as características técnicas, no projeto de uma rodovia nova, considerando as classes de projeto e respectivas velocidades diretrizes, de acordo com as Normas e Instruções vigentes no DNER, foram atualizadas pelo Manual de projeto geométrico de rodovias rurais (DNER, 1999) e estão discriminados na tabela 2.3 adiante.

Além dessas Normas correspondentes aos casos de projetos de rodovias novas, o DNER estabeleceu também Normas admissíveis para os casos de melhoramentos em rodovias já existentes, que são, em princípio, um pouco menos restritivas que as anteriores.

Para tanto, foram introduzidas novas classes de projeto, aplicáveis aos casos de melhoramentos de rodovias existentes, que foram denominadas M-0, M-I, M-II, M-III e M-IV, que correspondem, respectivamente, às classes de Melhoramentos para as rodovias de Classe 0, Classe I, Classe II, Classe III e Classe IV.

A fixação de parâmetros mínimos ou recomendáveis diferenciados para as características técnicas de projetos de reabilitação ou de melhoramentos de rodovias já existentes tem como objetivo principal balizar o melhoramento das condições técnicas das rodovias com investimentos adicionais relativamente pequenos, pois pressupõem viabilizar o máximo aproveitamento das pistas e das plataformas existentes (DNER, 1999, p. 171).

TABELA 2.3 – CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS PARA O PROJETO DE RODOVIAS NOVAS

DESCRIÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	Unidade	CLASSE 0			CLASSE I			CLASSE II			CLASSE III			CLASSE IV A			CLASSE IV B		
		Plano	Ond.	Mont	Plano	Ond.	Mont	Plano	Ond.	Mont	Plano	Ond.	Mont	Plano	Ond.	Mont	Plano	Ond.	Mont
<b>Velocidade Diretriz Mínima</b>	km/h	120	100	80	100	80	60	100	70	50	80	60	40	80	60	40	60	40	30
Distância de Visibilidade de Parada:																			
- Mínimo Desejável	m	310	210	140	210	140	85	210	110	65	140	85	45	140	85	45	85	45	30
- Mínimo Absoluto	m	205	155	110	155	110	75	155	90	60	110	75	45	110	75	45	75	45	30
Distância Mínima de Visibilidade de Ultrapassagem	m	-	-	-	680 <sup>(IB)</sup>	560 <sup>(IB)</sup>	420 <sup>(IB)</sup>	680	490	350	560	420	270	560	420	270	420	270	180
Raio Mínimo de Curva Horizontal (p/Superelev. Máx.)	m	540	345	210	345	210	115	375	170	80	230	125	50	230	125	50	125	50	25
Taxa de Superelevação Máxima	%	10	10	10	10	10	10 <sup>(1)</sup>	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
Rampa Máxima:																			
- Máximo Desejável	%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
- Máximo Absoluto	%	3	4	5	3	4,5	6	3	5	7	4	6	8	4	6	8	6	8	10
Valor de K para Curvas Verticais Convexas:																			
- Mínimo Desejável	m/%	233	107	48	107	48	18	107	29	10	48	18	5	48	18	5	18	5	2
- Mínimo Absoluto	m/%	102	58	29	58	29	14	58	20	9	29	14	5	29	14	5	14	5	2
Valor de K para Curvas Verticais Côncavas:																			
- Mínimo Desejável	m/%	80	52	32	52	32	17	52	24	12	32	17	7	32	17	7	17	7	4
- Mínimo Absoluto	m/%	50	36	24	36	24	15	36	19	11	24	15	7	24	15	7	15	7	4
Largura da Faixa de Trânsito:																			
- Mínimo Desejável	m	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
- Mínimo Absoluto	m	3,60	3,60	3,60	3,60	3,60	3,60	3,60	3,50	3,30	3,50	3,30	3,30	3,00	3,00	3,00	2,50	2,50	2,50
Largura do Acostamento Externo:																			
- Mínimo Desejável	m	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
- Mínimo Absoluto	m	3,50	3,00	3,00	3,00	2,50	2,50	2,50	2,50	2,00	2,50	2,00	1,50	1,30	1,30	0,80	1,00	1,00	0,50
Largura do Acostamento Interno:																			
- Pistas de 2 faixas	m	0,60-1,20	0,60-1,00	0,50-0,60	Somente para a Classe IA;														
- Pistas de 3 faixas	m	2,50-3,00	2,00-2,50	2,00-2,50	Aplicam-se os mesmos valores			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
- Pistas de 4 faixas	m	3,00	2,50-3,00	2,50-3,00	Indicados para a Classe 0.			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Gabarito Vertical (altura livre)																			
- Mínimo Desejável	m	-	-	-	-	-	-	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50
- Mínimo Absoluto	m	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50
Afastamento Mínimo do Bordo do Acostamento:																			
- Obstáculos Contínuos	m	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
- Obstáculos Isolados	m	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Largura do Canteiro Central:																			
- Largura Desejável	m	10-18	10-18	10-18	10-12	10-12	10-12												
- Valor Normal	m	6-7	6-7	6-7	≥6	≥6	≥6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
- Mínimo Absoluto	m	3-7	3-7	3-7	3-7	3-7	3-7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

(1) Somente para a Classe IA; para a classe IB, considerar 8%.

Fonte dos dados primários: Manual de projeto geométrico de rodovias rurais (DNER, 1999, p. 161-168).

Na tabela 2.4 estão discriminados os valores máximos e mínimos estabelecidos pelas normas admissíveis para os projetos rodoviários que visam ao melhoramento de estradas existentes, de acordo com o DNER.

TABELA 2.4 – NORMAS ADMISSÍVEIS PARA O MELHORAMENTO DE ESTRADAS EXISTENTES

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	RELEVO DA REGIÃO	CLASSE DA RODOVIA			
		M-0	M-I	M-II	M-III/IV
Velocidade diretriz (km/h)	Plano	100	100	80	60
	Ondulado	80	80	60	40
	Montanhoso	60	60	40	30
Raio mínimo de curva horizontal (m)	Plano	430	340	200	110
	Ondulado	280	200	110	50
	Montanhoso	160	110	50	30
Rampa máxima (%)	Plano	3	3	3	4
	Ondulado	4	4,5	5	6
	Montanhoso	5	6	7	8
Distância mínima de visibilidade de parada (m)	Plano	150	150	100	75
	Ondulado	100	100	75	50
	Montanhoso	75	75	50	-
Distância mínima de visibilidade de ultrapassagem (m)	Plano	650	650	500	350
	Ondulado	500	500	350	175
	Montanhoso	350	350	175	-
Largura da pista de rolamento (m)	Plano	7,50	7,00	7,00	7,00
	Ondulado	7,50	7,00	6,00-7,00	6,00-7,00
	Montanhoso	7,50	7,00	6,00	6,00
Largura do acostamento externo (m)	Plano	3,00	2,50	2,00	1,50
	Ondulado	2,50	2,00	1,50	1,20
	Montanhoso	2,00	1,50	1,20	1,00
	Muito Montanhoso	1,50	1,00	1,00	0,80
Largura da faixa de domínio (m)	Plano	-	60	30	30
	Ondulado	-	70	40	30
	Montanhoso	-	80	50	50

Fonte: Manual de projeto geométrico de rodovias rurais (DNER, 1999, p.172).

Além dessas classes técnicas de projeto, o DNER estabeleceu, em 1976, no âmbito de um programa de financiamento para a construção de estradas vicinais, que contou com a participação técnica e financeira do Banco Internacional para a Reconstrução e Desenvolvimento (Banco Mundial – BIRD) e do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), outro conjunto de classes de projeto, para o qual foram editadas normas específicas.

Estas normas, que foram denominadas de “Normas para o projeto de rodovias vicinais”, estão sintetizadas na tabela 2.5.

TABELA 2.5 – NORMAS PARA O PROJETO DE RODOVIAS VICINAIS

ESPECIFICAÇÕES	INCLINAÇÃO TRANSVERSAL DO TERRENO	CLASSES DE PROJETO				
		A PAV	B PAV – RP	C PAV – RP	D RP	E RP – TN
Velocidade Diretriz do Projeto (km/h)	5 %	80	80	60	60	50
	20 %	60	60	40	40	40
	70 %	40	40	30	30	30
Raio Mínimo de Curva Horizontal (m)	5 %	200,00	200,00	110,00	110,00	70,00
	20 %	110,00	110,00	50,00	50,00	45,00
	70 %	50,00	50,00	30,00	30,00	30,00
Greide Máximo (%)	5 %	3,000	4,000	5,000	6,000	8,000
	20 %	5,000	6,000	7,000	8,000	10,000
	70 %	7,000	8,000	9,000	10,000	12,000
Distância Mínima de Visibilidade de Parada (m)	5 %	100,00	100,00	75,00	75,00	50,00
	20 %	75,00	75,00	50,00	50,00	-
	70 %	50,00	50,00	50,00	50,00	-
Distância Mínima de Visibilidade de Ultrapassagem (m)	5 %	500,00	500,00	-	-	-
	20 %	350,00	350,00	-	-	-
	70 %	175,00	175,00	-	-	-
Largura da Faixa de Domínio (m)	5 % 20 % 70 %	Largura entre Off-Sets mais 10,00 m para cada lado (em área rural) .				
Largura da Plataforma (m)	5 %	9,00	8,000	7,50	7,00	6,00
	20 %	9,00	8,000	7,50	7,00	6,00
	70 %	9,00	8,000	7,50	7,00	6,00
Largura da Pista (Pavimento) (m)	5 %	7,00	6,000	5,50	-	-
	20 %	7,00	6,000	5,50	-	-
	70 %	7,00	6,000	5,50	-	-
Largura do Acostamento (m)	5 %	1,00	1,000	1,00	-	-
	20 %	1,00	1,000	1,00	-	-
	70 %	1,00	1,000	1,00	-	-
Volume Médio Diário de tráfego no ano 10 (vpd)	-	700-300	400-200	250-100	150-50	75-0

OBSERVAÇÕES: Inclinação Transversal do Terreno : 5%≡ Relevo Plano; 20%≡ Relevo Ondulado; 70%≡ Relevo Montanhoso.

PAV = Pavimentada; RP = Revestimento Primário; TN = Terreno Natural.

Fonte: II Manual de Rodovias Vicinais - BBD II (BNDES, 1976).

### 2.3.3.1 Critérios para a definição da classe de projeto

Para a definição da classe a ser adotada no projeto de um trecho de rodovia, as normas do DNER recomendam que sejam considerados os seguintes critérios principais:

- respeitar a posição hierárquica da rodovia dentro da classificação funcional;
- atender adequadamente aos volumes de tráfego previstos ou projetados;
- verificar os Níveis de Serviço com que a demanda será atendida;
- outras condicionantes, tais como fatores de ordem econômica, decisões relacionadas com o desenvolvimento nacional ou regional.

Considerando o critério de observar a classificação funcional de rodovias, o DNER sugere a seguinte correspondência com as classes de projeto:

- rodovias do Sistema Arterial Principal: Classes 0 e I;
- rodovias do Sistema Arterial Primário: Classe I;
- rodovias do Sistema Arterial Secundário: Classes I e II;



- rodovias do Sistema Coletor Primário: Classes II e III;
- rodovias dos sistemas Coletor Secundário e Local: Classes III e IV;

O Manual de projeto geométrico de rodovias rurais do DNER considera que as rodovias vicinais integram as classes funcionais correspondentes ao Sistema Coletor Secundário ou ao Sistema Local. Assim, os projetos das rodovias integrantes dessas classes funcionais podem ser desenvolvidos, alternativamente, de acordo com as Normas para o projeto de rodovias vicinais (BNDES, 1976).

O critério de atendimento aos volumes de tráfego é observado quando se estabelece a classe de projeto em consonância com as diretrizes apontadas na tabela 2.2.

O critério de verificação dos Níveis de Serviço projetados para a operação da rodovia deve ser sempre observado, principalmente para as rodovias de padrão mais elevado, envolvendo maiores volumes de tráfego, mediante a realização de estudos específicos de análise de capacidade de rodovias, que fogem ao escopo desta publicação.

### 2.3.3.2 Algumas observações a respeito das Normas do DNER

Apesar de resultarem de atualizações feitas ao longo do tempo, incluindo a introdução de critérios sugeridos pela experiência nacional, alguns dos valores apontados pelas Normas do DNER apresentaram uma involução qualitativa em relação aos propostos pelo Manual de projeto de engenharia rodoviária (DNER, 1974) e pelas Normas para o projeto de estradas de rodagem (DNER, 1975), buscando favorecer uma política de redução dos custos de construção.

O caso mais chamativo foi a diminuição (desde 1979, com a edição das Instruções para o projeto geométrico das rodovias rurais pelo DNER) da largura mínima admitida para as faixas de trânsito, nos projetos de rodovias de Classe 0 (Classe Especial) em regiões de relevo plano ou ondulado. A largura mínima, anteriormente fixada em 3,75 m, foi reduzida para 3,60 m, contrariando a boa técnica e a própria tendência que se verifica na utilização de faixas mais largas nos projetos de nível mais elevado.

Observe-se que, curiosamente, as Normas mantiveram de forma indireta<sup>16</sup> a recomendação de largura de faixa de trânsito de 3,75 m para os projetos de melhoramentos de rodovias existentes na Classe 0, em regiões de relevos plano ou ondulado, condições às quais corresponde velocidade diretriz menor que a fixada para o projeto de rodovias novas – e para essas, a largura recomendada para a faixa de trânsito foi reduzida para 3,60 m!

O projetista não deve tomar cega e rigidamente os valores apontados nas Normas e Instruções, sendo sempre conveniente lembrar que tais valores, exceto quando explicitado em contrário, são os mínimos (ou máximos) aplicáveis, podendo o projetista adotar a boa prática de fixar valores menos restritivos, quando devidamente justificável do ponto de vista técnico-econômico, para ajustamento a condições particulares referentes à demanda a atender, ao meio ambiente ou ao entorno afetado pela rodovia.

As Normas do DNER estabelecem, ainda, uma terminologia imprópria para as rodovias de Classe Especial, ao denominá-las “Vias Expressas”.

Esta denominação não é a mais apropriada, pois na terminologia internacional as rodovias desta classe de projeto, que contam com controle total de acessos e interseções em níveis distintos, são classificadas como *Freeways*. O termo “Via Expressa” deveria ser reservado às denominadas *Expressways*, que são rodovias de pistas duplas, com controle parcial de acessos, admitindo interseções no mesmo nível, correspondendo às rodovias da Classe IA do DNER.

---

<sup>16</sup> As Normas para o melhoramento de rodovias existentes foram fixadas originalmente pela Portaria 3602 do DNER, de 24 out. 1969, que se referia a “largura do pavimento”, quando deveria ter fixado largura mínima de faixa de trânsito, pois se poderia estar projetando, na Classe 0, rodovias com mais de 2 faixas de trânsito por sentido.



# 3

## ESTUDOS DE TRAÇADO

Parece um cordão sem ponta, pelo chão desenrolado,  
 Rasgando tudo o que encontra: a terra, de lado a lado ...  
 Estrada de sul a norte, eu que passo penso e peço  
 Notícias de toda sorte: de dias que eu não alcanço  
 De noites que eu desconheço, de amor, de vida ou de morte ...

"A ESTRADA E O VIOLEIRO", de Sidney Miller (1967), na magistral interpretação de Nara Leão.

### 3.1 INTRODUÇÃO

Uma das fases preliminares, que antecede os trabalhos de execução do projeto geométrico propriamente dito, é a constituída pelos estudos de traçado, que tem por objetivos principais (i) a delimitação dos locais convenientes para a passagem da rodovia, a partir da obtenção de informações básicas a respeito da geomorfologia da região, e (ii) a caracterização geométrica desses locais de forma a permitir o desenvolvimento do projeto pretendido.

De conformidade com os objetivos buscados, os estudos de traçado podem ser subdivididos em duas etapas, comumente designadas por *Reconhecimento* e por *Exploração*, respectivamente.

As definições e comentários adiante colocados referem-se ao caso clássico e geral de projeto de uma rodovia nova em áreas que podem não contar com acessos rodoviários existentes ao longo da região onde se pretende desenvolver o projeto.

Na prática, outras condições podem ocorrer, devendo o leitor considerar possíveis adaptações dos procedimentos apontados aos casos reais, incluindo eventuais estudos complementares ou mesmo etapas adicionais que venham a se tornar necessários.

É o caso, por exemplo, da elaboração de projetos de duplicação de rodovias existentes, em que os traçados dessas rodovias, em pleno serviço, muitas vezes condicionam a definição dos locais de passagem (quando não dos próprios traçados) das rodovias ampliadas. Nesses tipos de projeto, uma das etapas indispensáveis é constituída pelos estudos do *Plano Funcional* da Rodovia, que visa identificar os efeitos da inserção da rodovia no contexto do sistema existente, caracterizando qualitativa e quantitativamente os impactos decorrentes, e orientando a proposição de alternativas para o desenvolvimento do projeto<sup>17</sup>.

### 3.2 RECONHECIMENTO

Para que se possa entender com maior clareza o que se entende por Reconhecimento, serão apresentadas duas definições preliminares:

- *Traçado* de uma rodovia: é a linha que constitui o projeto geométrico da rodovia em planta e em perfil; sem o rigor acadêmico, pode-se imaginar o traçado como sendo uma linha que representa espacialmente (ou fisicamente) a rodovia;
- *Diretriz* de um traçado ou de uma rodovia: é um itinerário, compreendendo uma ampla faixa de terreno, ao longo (e ao largo) da qual se presume que possa ser lançado o traçado da rodovia.

---

<sup>17</sup> Para maiores informações, sugere-se a leitura do artigo "Alguns aspectos para elaboração de planos funcionais visando o aumento de capacidade e da segurança de rodovias" (PITTA, SIMON et LEE, 1990).

O projeto de uma rodovia pressupõe sempre a existência de dois pontos – o de origem e o de destino – a serem ligados pela rodovia. No estudo de alternativas visando à ligação entre esses pontos de início e de fim, podem ser identificadas várias diretrizes para lançar o traçado da rodovia.

O *Reconhecimento* é a etapa dos estudos de traçado que tem por objetivo a escolha da diretriz que permita o lançamento do melhor traçado, que resulte viável, técnica e economicamente.

No desenvolvimento dos trabalhos de Reconhecimento, para estudos de traçado, poderão vir a ser estabelecidos, além dos pontos de início e de fim do traçado, outros pontos intermediários que devem ser obrigatoriamente atingidos (ou, por extensão conceitual, evitados) pelo traçado – os denominados *Pontos Obrigados* – quais sejam:

- *Pontos Obrigados de Condição* – que são os pontos a serem obrigatoriamente atingidos (ou evitados) pelo traçado, por razões de ordem social, econômica ou estratégia, tais como a existência de cidades, vilas, povoados, de áreas de reservas, de instalações industriais, militares, e outras a serem atendidas (ou não) pela rodovia;
- *Pontos Obrigados de Passagem* – que são aqueles em que a obrigatoriedade de serem atingidos (ou evitados) pelo traçado da rodovia é devida a razões de ordem técnica, face à ocorrência de condições topográficas, geotécnicas, hidrológicas e outras que possam determinar a passagem da rodovia, tais como locais mais (ou menos) convenientes para as travessias de rios, acidentes geográficos e locais de ocorrência de materiais.

### 3.2.1 Processos de Reconhecimento

Em termos técnicos, pode-se dizer que o Reconhecimento compreende, em última análise, a realização de estudos topológicos, objetivando definir a forma global e a conformação do terreno.

Tais estudos topológicos consistem na observação detalhada do modelado e da configuração ou forma da região situada entre os pontos extremos que se quer ligar pela rodovia, registrando planimetrica e/ou altimetricamente os acidentes geográficos e assinalando indicações características tais como, entre outras:

- classificação orográfica da região (plana, ondulada, montanhosa);
- uso do solo, incluindo ocupações urbanas, instalações, áreas de reservas;
- acidentes geográficos, rios, lagoas, quedas d'água;
- tipos de solos, ocorrências de materiais, cobertura vegetal.

Para tanto, podem ser imaginadas diversas formas de se efetuar os trabalhos de Reconhecimento, dependendo das características da região, dos recursos disponíveis e do próprio tipo de projeto a realizar.

De forma não exaustiva, podem ser considerados os seguintes processos principais de Reconhecimento:

- a) exame de mapas e cartas da região: várias regiões do país já contam com mapas e cartas resultantes de levantamentos sistemáticos do território nacional, a exemplo do Estado de Santa Catarina, cujo território está integralmente coberto com cartas nas escalas 1 : 50.000 e/ou 1 : 100.000; essas cartas contêm informações como a localização de vilas, povoados, cidades, acidentes geográficos, rios e cursos d'água, estradas e rodovias, incluindo os respectivos topônimos, além de limites políticos e curvas de nível, com precisão cartográfica, constituindo-se em excelentes recursos para o assinalamento de itinerários que interessam ao lançamento de possíveis traçados;
- b) inspeção in loco: que se constitui, a rigor, no processo mais eficiente para que o Engenheiro projetista possa conhecer de perto as condições das áreas ao longo da região a ser atingida pelo traçado, visando noção qualitativa a respeito do uso do solo, das características de ocupação no entorno, dos tipos e condições dos solos, das

- ocorrências de materiais aproveitáveis, dos potenciais problemas de ordem ambiental, e outras informações que podem auxiliar no balizamento da diretriz para o projeto;
- c) sobrevôo da região: em muitos casos, principalmente quando se trata de projetos em áreas não ocupadas e de difícil acesso terrestre ou aquaviário, é bastante útil sobrevoar a região, com equipamento adequado (aeronave de baixa velocidade, ultraleve ou helicóptero, por exemplo), oferecendo ao projetista uma visão perspectiva e abrangente das áreas, auxiliando-o quanto à orientação geral a ser dada à diretriz;
- d) exame de fotografias aéreas, de cartas imagens de radar e de imagens obtidas por satélites: quando disponíveis, fotografias aéreas tomadas em escalas adequadas e com observância de requisitos técnicos apropriados podem ser bastante úteis para a visualização da configuração geral do terreno, do uso do solo, da cobertura vegetal e de outros detalhes, principalmente quando se dispõem de pares aerofotográficos que permitam visão estereoscópica; as cartas imagens de radar têm a vantagem de oferecer a grafia e disposição dos elementos topológicos apostos sobre uma imagem do terreno, com elaboração independente de nebulosidade; tanto as fotografias aéreas como as cartas imagens de radar geralmente são aplicáveis ao Reconhecimento quando previamente obtidas para outras finalidades, já que sua obtenção específica para o Reconhecimento poderia resultar em custos exorbitantes; imagens obtidas por satélites têm as vantagens de serem captadas (e armazenadas em meio magnético) de forma sistemática, e com diversos comprimentos de onda (desde a radiação visível até a infra-vermelha), tendo como desvantagem, até o presente, a disponibilização comercialmente viável de imagens somente em escalas ainda muito grandes (com resoluções muito pequenas) para fins de Reconhecimento; no entanto, é um recurso cuja utilização tende a se expandir na medida em que evolui a tecnologia de captação e de armazenamento, e em que se disponibilizam comercialmente as imagens a custos cada vez menores.

Outros dados e informações úteis para a definição da diretriz, a serem obtidos durante o Reconhecimento<sup>18</sup>, e que não serão objeto de consideração nesta publicação, são os que dizem respeito às características sócio-econômicas e aos estudos de demanda, necessários às avaliações econômico-financeiras, para instrumentar estudos de alternativas de traçados.

### 3.3 EXPLORAÇÃO

Uma vez definida a diretriz para o desenvolvimento do projeto de uma rodovia, a etapa seguinte dos estudos de traçado se constitui na *Exploração*, que tem como objetivo o levantamento detalhado da diretriz, visando à obtenção de uma planta plani-altimétrica da faixa de terreno que constitui essa diretriz, em escala adequada, com precisão topográfica.

Essa planta plani-altimétrica, seja em meio físico (papel) ou em meio virtual (digital), é o recurso técnico básico sobre o qual se poderá desenvolver o projeto geométrico da rodovia.

A denominação dada a essa etapa decorre do procedimento clássico (com utilização de recursos da topografia convencional) para a realização do levantamento plani-altimétrico de uma faixa de terreno (diretriz) selecionada para que nela seja lançado o traçado de uma rodovia.

Nesse procedimento clássico, envolvendo a utilização de teodolitos, trenas, níveis, miras, cruzetas (ou distanciômetros, estações totais e equipamentos complementares), as equipes de topografia implantam uma linha poligonal ao longo da faixa de terreno, cujos vértices são materializados por piquetes cravados no terreno.

Essa poligonal, geralmente designada de *poligonal básica*, servirá como linha de referência, sobre a qual se apoiará todo o levantamento plani-altimétrico da faixa de terreno.

---

<sup>18</sup> Para maiores esclarecimentos a respeito, o leitor poderá compulsar, entre outras referências, o Manual de serviços de consultoria para estudos e projetos rodoviários – vol. 2 : Manual de execução de serviços (DNER, 1978).

Concomitantemente à materialização dos vértices da poligonal básica, são medidos, com precisão topográfica, os comprimentos dos alinhamentos e os ângulos nos vértices, sendo também medido o Azimute ao menos do primeiro alinhamento.

A seguir, equipe auxiliar de topografia procede ao *estaqueamento* da poligonal básica, que consiste em marcar, a partir do vértice de origem, pontos a cada 20,00 m de distância, que são materializados por pequenas estacas de madeira (daí a denominação de *estacas* para esses pontos) com seção quadrada de cerca de 1 polegada de lado, sendo os pontos marcados com precisão por meio de pregos cravados nas estacas.

São então determinadas as cotas das estacas<sup>19</sup> (e dos vértices) da poligonal básica, referidas a uma dada RN (referência de nível), mediante nivelamento e contra-nivelamento da linha.

Levantam-se após as seções transversais do terreno em cada estaca, medindo-se as distâncias e cotas (ou diferenças de nível) de pontos do terreno, em relação à estaca, de um e outro lado da poligonal básica, segundo uma linha perpendicular à poligonal básica.

Feitos esses levantamentos, procede-se ao desenho, em uma escala apropriada (geralmente em papel milimetrado, na escala 1:100), das seções transversais do terreno, determinando-se graficamente as posições dos pontos das seções que correspondem a cotas inteiras.

Desenhando-se após a poligonal básica, pode-se marcar graficamente, nas seções transversais correspondentes a cada estaca, as posições dos pontos que correspondem a cotas inteiras, obtendo-se a uma nuvem de pontos cotados.

Ligando-se adequadamente os pontos de mesma cota, obtém-se a representação gráfica das curvas de nível correspondentes às cotas inteiras, ao largo da faixa de terreno coberta pelas seções transversais levantadas ao longo da poligonal básica. Em outras palavras, obtém-se a representação gráfica, em escala apropriada, da planta plani-altimétrica da diretriz.

Para fins de projeto geométrico, as escalas convencionalmente utilizadas para as plantas plani-altimétricas são:

- 1 : 2.000, nos casos de projetos em zonas rurais;
- 1 : 1.000, nos casos de projetos em áreas urbanas (que necessitam de maior precisão gráfica, devido às interferências com propriedades e imóveis);
- 1 : 500 ou 1 : 250, em casos especiais, que requerem maior precisão, tais como projetos de interseções ou outros dispositivos.

As plantas plani-altimétricas são representadas com curvas de nível de metro em metro ou, excepcionalmente, com curvas de nível a cada meio metro, nos casos de terrenos planos ou de projetos que requeiram maior precisão em função das características de ocupação das áreas lindeiras.

Além desse procedimento clássico, há outras formas de obtenção de plantas plani-altimétricas para fins de projeto geométrico, sendo as mais comuns, atualmente:

- a utilização de recursos de aerofotogrametria convencional, compreendendo levantamentos aerofotográficos e posterior restituição aerofotogramétrica a partir de pares de aerofotos;
- o levantamento de nuvens de pontos em campo com estações totais, com armazenamento dos pontos cotados e representação do relevo do terreno em meio digital por meio de modelos digitais do terreno;
- a combinação de recursos de aerofotogrametria com retificação digital das imagens e representação do relevo do terreno por meio de modelos digitais do terreno.

A representação de terreno em meio digital, por meio dos chamados modelos digitais do terreno, tem sido utilizada com intensidade crescente, na medida em que os projetos geométricos vêm sendo desenvolvidos com o auxílio de micro-computadores e com o uso de softwares de projeto apropriados.

---

<sup>19</sup> Determinam-se, na verdade, as cotas do terreno nas posições correspondentes às estacas.

Qualquer que seja o recurso utilizado para a obtenção da representação do terreno, imagine-se, para fins de aprendizado, que se conte com uma planta plani-altimétrica da diretriz do projeto, que servirá como elemento técnico sobre o qual poderão ser definidos, grafica e analiticamente, os parâmetros do projeto geométrico de uma rodovia.

### 3.4 CÁLCULOS DA POLIGONAL

Como já comentado, tão logo materializada uma linha poligonal no terreno, marcando-se fisicamente seus vértices, pode-se medir, com precisão topográfica, os comprimentos dos alinhamentos, os ângulos nos vértices, e os Azimutes (ao menos, o Azimute do primeiro alinhamento).

Uma vez medidos esses elementos, a poligonal estará analiticamente definida, podendo-se caracterizar a posição de qualquer de seus pontos.

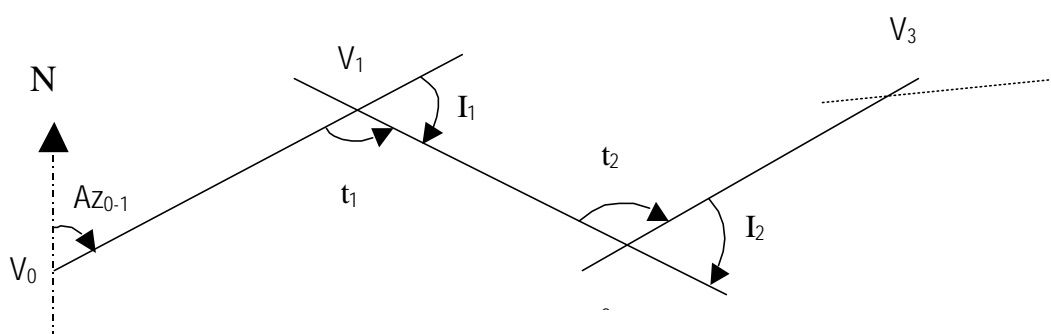
Para tanto, há dois tipos de cálculos básicos a proceder quando se calculam elementos da poligonal: o cálculo de azimutes dos alinhamentos, e o cálculo de coordenadas dos vértices (ou de outros pontos) da poligonal.

#### 3.4.1 Cálculo de Azimutes

Ao se proceder à determinação de ângulos nos vértices de uma poligonal, pode-se estar medindo diferentes tipos de ângulos, quais sejam: ângulos topográficos (diretos ou retrógrados), ou ângulos de deflexão (FONSECA, 1973, p. 38; 52). Embora quaisquer deles sirvam para a definição analítica da poligonal, esses ângulos são conceitualmente diferentes, como se pode observar no esquema da figura 3.1.

O ângulo de deflexão (denominado simplesmente por *deflexão*) em um vértice, é a medida do quanto se está desviando quando se passa do alinhamento anterior para o seguinte nesse vértice; assim, pode-se ter dois tipos de deflexão: a *deflexão à direita*, e a *deflexão à esquerda*, conforme o sentido verificado no desvio de trajetória.

FIGURA 3.1 – ÂNGULOS INTERNOS E DEFLEXÕES EM POLIGONAIS ORIENTADAS



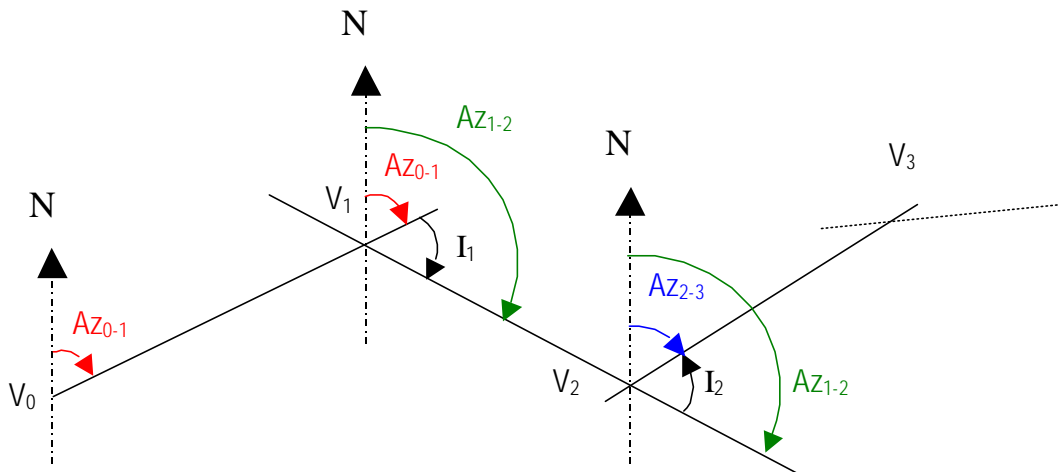
Na figura 3.1, o ângulo  $I_1$  é a deflexão (à direita) no vértice  $V_1$ , e o ângulo  $I_2$  é a deflexão (à esquerda) no vértice  $V_2$ . O ângulo  $t_1$  é o denominado *ângulo topográfico direto* no vértice  $V_1$ , sendo o ângulo  $t_2$  o *ângulo topográfico retrógrado* no vértice  $V_2$ .

Na mesma figura, está assinalado por  $Az_{0-1}$  o Azimute do alinhamento  $V_0 - V_1$ , lembrando que o Azimute de um alinhamento (orientado) é o ângulo, contado no sentido horário, formado entre o Norte e o alinhamento, podendo variar no intervalo semi-aberto  $[0^\circ, 360^\circ)$ .

Uma vez conhecidos os ângulos de deflexão nos vértices de uma poligonal e o Azimute de um dos alinhamentos, ficam automaticamente determinados os Azimutes dos demais alinhamentos.

Na figura 3.2, está representada a mesma poligonal anterior, tendo-se acrescentado, nos vértices, as orientações (paralelas) indicativas do Norte, e os Azimutes dos alinhamentos que se interceptam nesses vértices.

FIGURA 3.2 – DEFLEXÕES E AZIMUTES EM POLIGONAIS ORIENTADAS



Observando-se as disposições dos ângulos nessa figura, pode-se estabelecer as seguintes relações:

$$AZ_{1-2} = AZ_{0-1} + I_1 ;$$

$$AZ_{2-3} = AZ_{1-2} - I_2 .$$

Inferese, a partir daí, a seguinte regra geral: "numa poligonal orientada, o Azimute de um alinhamento é sempre igual ao Azimute do alinhamento anterior, mais (ou menos) a deflexão: mais, quando se trata de uma deflexão à direita, e menos quando se trata de uma deflexão à esquerda".

### 3.4.2 Cálculo de coordenadas

Se uma poligonal orientada for referida a um sistema de eixos cartesianos cujo eixo das ordenadas coincida com a orientação norte (N) e cujo eixo das abcissas coincida com a orientação leste (E), pode-se determinar analiticamente as coordenadas cartesianas de quaisquer pontos da poligonal, desde que se conheçam as coordenadas de um ponto da poligonal, os comprimentos ao longo dos alinhamentos, e os Azimutes desses alinhamentos.

Na figura 3.3 está representado um alinhamento de uma poligonal referido a um sistema cartesiano com as características anteriormente mencionadas, estando indicados o comprimento do alinhamento, o seu Azimute, e as coordenadas cartesianas (abcissas  $x$  e ordenadas  $y$ ), que são denominadas, na terminologia de projeto, de *coordenadas absolutas*.

Supondo conhecidas as coordenadas absolutas  $X_A$  e  $Y_A$  do ponto A, pode-se calcular facilmente as coordenadas absolutas  $X_B$  e  $Y_B$  do ponto B, por meio das seguintes relações:

$$X_B = X_A + L_{AB} \cdot \text{sen} (AZ_{A-B}) ;$$

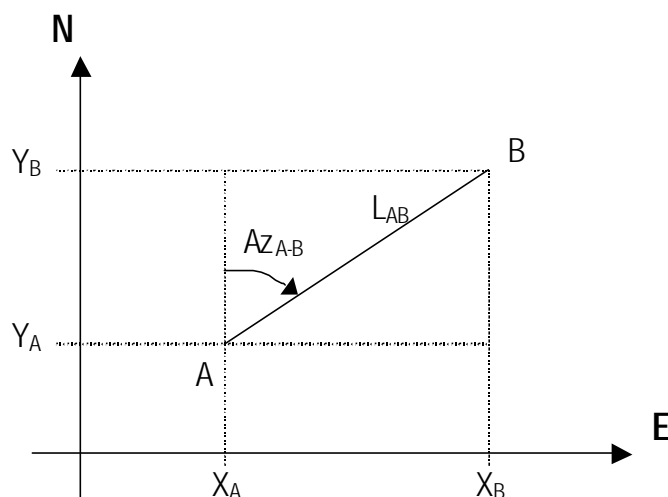
$$Y_B = Y_A + L_{AB} \cdot \text{cos} (AZ_{A-B}) .$$



As projeções do alinhamento AB segundo os eixos coordenados, que equivalem aos comprimentos  $X_A - X_B$  e  $Y_A - Y_B$ , são denominadas de *coordenadas relativas* (ordenadas relativas e abcissas relativas, no caso exemplificado).

Assim, pode-se inferir a seguinte regra geral: "numa poligonal orientada, as coordenadas absolutas de um vértice são iguais às coordenadas absolutas do vértice anterior mais (ou menos) as respectivas coordenadas relativas".

FIGURA 3.3 – SISTEMA CARTESIANO E COORDENADAS ABSOLUTAS



Observe-se que essa formulação é genérica, ou seja, as fórmulas resultam aplicáveis para qualquer quadrante em que se situe o alinhamento, pois os sinais das coordenadas relativas resultam automaticamente do cálculo das funções seno e cosseno dos Azimutes (já que os ângulos correspondentes variam de  $0^\circ$  a  $< 360^\circ$ ).

Em projeto geométrico, as coordenadas absolutas são usualmente expressas em metros, com precisão topográfica, relacionadas a um sistema reticulado plano, referenciado à projeção conforme Universal Transversa de Mercator (UTM).

A determinação das coordenadas absolutas dos vértices (bem assim das coordenadas absolutas de quaisquer pontos) de uma poligonal é muito útil para fins de representação gráfica dessa poligonal, em especial quando se trata de poligonais abertas, como sói acontecer nos trabalhos pertinentes à elaboração de projetos geométricos de rodovias.

O desenho de poligonais extensas fica bastante facilitado quando feito com auxílio das coordenadas dos pontos, referidas a um sistema reticulado (sistema de eixos cartesianos). Isto permite não só maior precisão gráfica quando o desenho é feito manualmente, mas também simplifica a questão da divisão do desenho em pranchas, e a articulação das mesmas ao longo do projeto.

### 3.5 DEFINIÇÃO DOS TRAÇADOS

No lançamento de traçados para as rodovias, estes devem ser considerados como entidades tridimensionais contínuas, com mudanças de direção fluentes e gradativas.

Para facilidade de trabalho e conveniência técnica na elaboração dos projetos, os elementos geométricos da rodovia são decompostos, como já comentado anteriormente, nos elementos em planta, em perfil e em seção transversal.


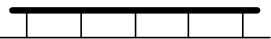

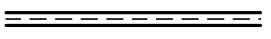
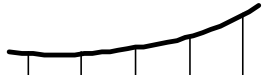

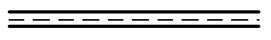
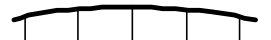


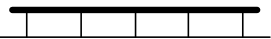





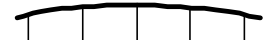

No entanto, deve-se lembrar que a rodovia projetada, uma vez construída e aberta ao tráfego, apresenta-se aos usuários como entidade tridimensional, em perspectiva natural, com seus

elementos em planta, em perfil e em seção transversal atuando de forma combinada sobre os usuários em movimento, sujeitando-os a esforços – e, conseqüentemente, a desconfortos – dinâmicos, que podem afetar a fluidez do tráfego, as condições de segurança e, enfim, a qualidade do projeto.

Assim, é sempre necessário buscar a continuidade espacial dos traçados, mediante intencional e criteriosa coordenação dos seus elementos geométricos constituintes, em especial dos elementos planimétricos e altimétricos, visando ao adequado controle das condições de *fluência ótica* e das condições de *dinâmica de movimento* que o traçado imporá aos usuários.

As combinações dos diferentes elementos do traçado em planta e em perfil resultam na formação de entidades tridimensionais com aparências diferenciadas, como se pode visualizar nas ilustrações da figura 3.4, onde se mostram as conjugações básicas e os resultados correspondentes, em termos de percepção dos traçados, na perspectiva dos usuários.

FIGURA 3.4 – COMBINAÇÃO DOS ELEMENTOS EM PLANTA E EM PERFIL

EM PLANTA	EM PERFIL	ELEMENTO ESPACIAL
 Tangente	 Trecho reto	 Tangente com inclinação longitudinal única
 Tangente	 Curva	 Concavidade em tangente
 Tangente	 Curva	 Convexidade em tangente
 Curva	 Trecho reto	 Curva horizontal com inclinação longitudinal única
 Curva	 Curva	 Concavidade com curva horizontal
 Curva	 Curva	 Convexidade com curva horizontal

### 3.5.1 Recomendações das Normas do DNER

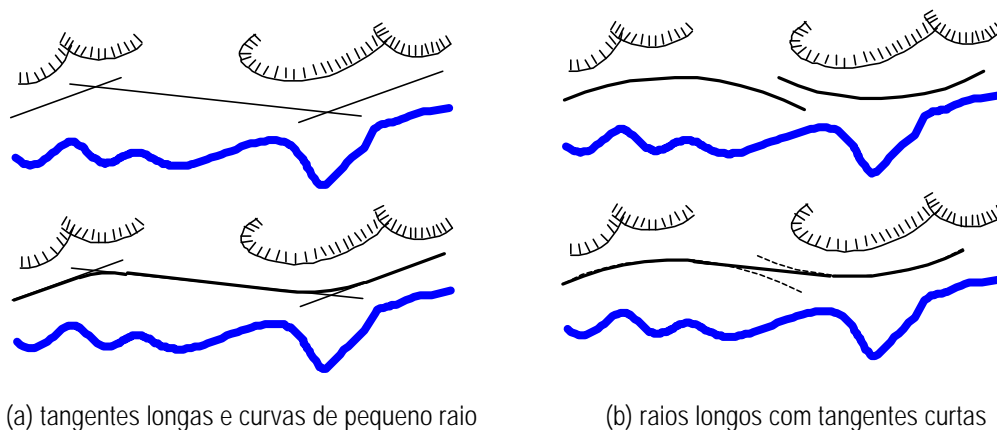
As Normas do DNER fazem algumas recomendações a serem observadas para a definição dos traçados de rodovias, com o objetivo de se evitar problemas e defeitos mais comuns nos projetos geométricos.

As principais recomendações, transcritas do Manual de projeto de engenharia rodoviária (DNER, 1974) e do Manual de projeto geométrico de rodovias rurais (DNER, 1999), estão resumidas a seguir:

a) recomendações quanto ao traçado em planta:

- os traçados devem ser constituídos, em planta, por arcos de circunferência de raios e desenvolvimento tão amplos quanto a topografia o permitir, concordados por pequenas tangentes que pareçam, em perspectiva, partes integrantes de curvas compostas e contínuas; esta recomendação é especialmente válida para os projetos em classes mais elevadas – Classe 0 ou I –, implicando no uso de curvas com raios bastante grandes, que propiciem distâncias de visibilidade adequadas mesmo nos trechos em curva; as Normas do DNER não recomendam, evidentemente, a substituição de trechos em tangente por sucessões de curvas de pequenos raios; na figura 3.5 está ilustrada a diferença entre essas diferentes concepções de traçado;

FIGURA 3.5 – POLÍTICAS PARA CONCORDÂNCIAS HORIZONTAIS



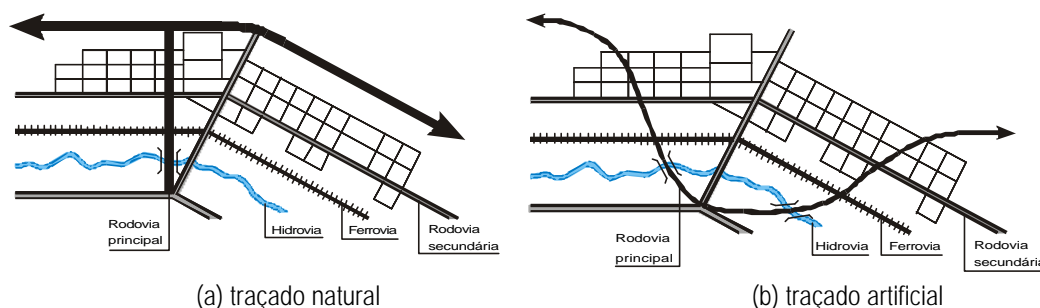
(a) tangentes longas e curvas de pequeno raio

(b) raios longos com tangentes curtas

Fonte: Manual de projeto geométrico de rodovias rurais (DNER, 1999, p. 64).

- as tangente longas devem ser evitadas, exceto em condições topográficas especiais, onde se harmonizem com a paisagem, ou em travessias urbanas onde a ordem dominante seja a retilínea (vide figura 3.6).

FIGURA 3.6 – HARMONIA DOS TRAÇADOS COM A PAISAGEM



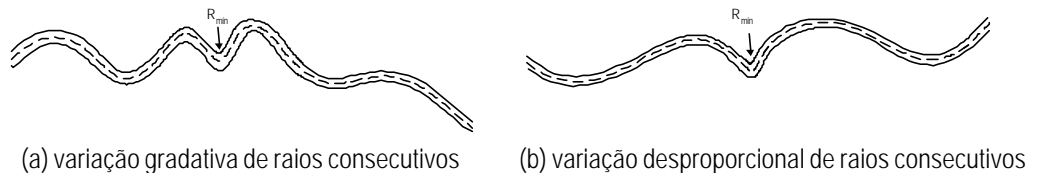
(a) traçado natural

(b) traçado artificial

Fonte: Manual de projeto de engenharia rodoviária (DNER, 1974, v. 3, cap. 9, p. 5/30).

- a extensão em tangente não deve ser maior que 3 km, não devendo ser maior que 2,5 vezes o comprimento médio das curvas adjacentes, nem maior que a distância percorrida por um veículo, na velocidade diretriz, durante o tempo de 1,5 minutos;
- os traçados devem ser tão direcionais e adaptados à topografia quanto possível, devendo os ângulos de deflexão ( I ) estarem situados entre 10° e 35°; para deflexões inferiores a 5°, deve-se efetuar a concordância de tal forma que o comprimento em curva, em metros, resulte maior que  $30 \cdot (10 - I^\circ)$ ; deflexões menores que 15' dispensam concordância com curva horizontal;
- nas extremidades de tangentes longas não devem ser projetadas curvas de pequeno raio;
- deve-se evitar o uso de curvas com raios muito grandes (maiores que 5.000 m, por exemplo), devido a dificuldades que apresentam para o seu percurso pelos motoristas;
- raios de curvas consecutivas não devem sofrer grandes variações, devendo a passagem de zonas de raios grandes para zonas de raios pequenos ser feita de forma gradativa (vide figura 3.7);

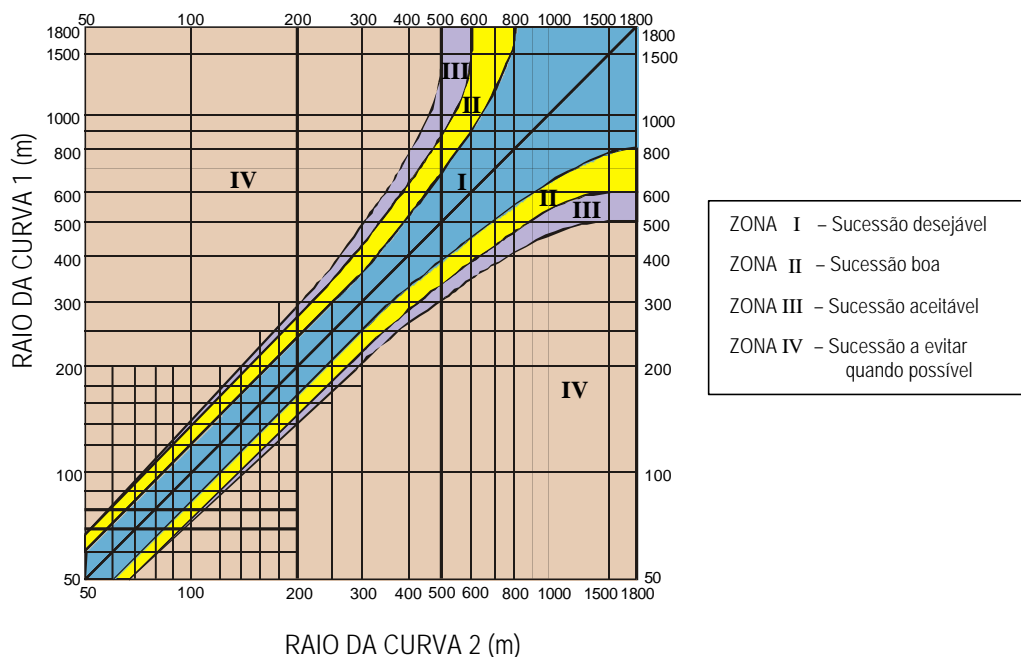
FIGURA 3.7 – VARIAÇÃO DOS RAIOS DE CURVAS CONSECUTIVAS



Fonte: Diretrizes para a concepção de estradas : condução do traçado – DCE-C (DER/SC, 1999, p. 34).

- a relação entre os raios de curvas consecutivas deve ser estabelecida de acordo com os critérios expressos no gráfico da figura 3.8;

FIGURA 3.8 – CRITÉRIOS PARA ESCOLHA DE RAIOS DE CURVAS SUCESSIVAS



Fonte: Manual de projeto geométrico de rodovias rurais (DNER, 1999, p. 66).

- duas curvas horizontais de sentidos opostos devem ser concordadas, preferencialmente, com a tangente mínima necessária;
- duas curvas horizontais de mesmo sentido não devem ser concordadas com tangente intermediária curta; a concordância poderá ser feita com curva composta ou com tangente intermediária, observadas as seguintes recomendações:
  - concordância com curva composta: a relação entre o raio maior e o raio menor ( $R_1/R_2$ ) deve observar às seguintes limitações:

$$R_2 < 100 \text{ m} : R_1 / R_2 < 1,3$$

$$100 \text{ m} < R_2 < 500 \text{ m} : R_1 / R_2 < 1,5$$

$$500 \text{ m} < R_2 < 1.000 \text{ m} : R_1 / R_2 < 1,7$$

$$1.000 \text{ m} < R_2 : R_1 / R_2 < 2,0 ;$$

- concordância com tangente intermediária: o comprimento da tangente intermediária ( $L$ ) deve ser superior à distância percorrida por um veículo, na velocidade diretriz ( $V$ ), durante o tempo de 15 segundos, o que resulta, aproximadamente:

$$L \text{ (m)} > 4 \cdot V \text{ (km/h)} ;$$

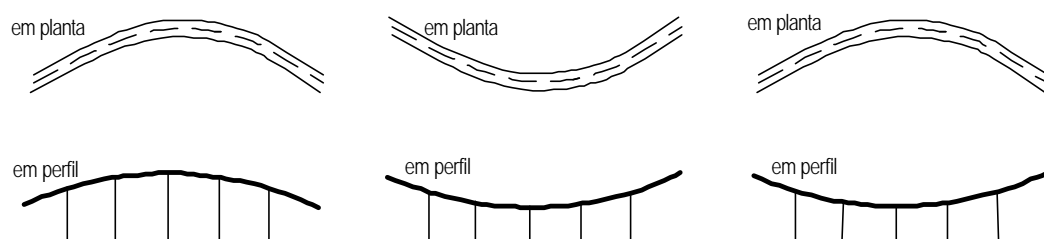
b) recomendações quanto ao traçado em perfil:

- o grade da rodovia deve resultar suave e uniforme, evitando-se as constantes quebras do alinhamento vertical e os pequenos comprimentos com rampas diferentes;
- nos trechos em corte ou em seção mista, deve-se projetar o grade com declividade igual ou superior a 1,000 %; rampas inferiores requerem cuidados especiais quanto à drenagem; o mínimo permitido é de 0,350 %, limitado a uma extensão de 30,00 m.
- nos trechos em corte, deve-se evitar concavidades com rampas de sinais contrários, para evitar problemas com a drenagem superficial;
- em regiões planas, o grade deve ser preferencialmente elevado;

c) recomendações quanto ao traçado coordenado em planta e em perfil:

- tangentes e curvas horizontais de grandes raios não devem estar associadas a rampas elevadas, nem as curvas horizontais de pequenos raios devem estar associadas a rampas pequenas;
- as tangentes longas devem estar, sempre que possível, associadas a curvas verticais côncavas, que atenuem a "rigidez" do trecho;
- o vértice da curva horizontal deve coincidir ou ficar próximo a vértice de curva vertical; a curva horizontal deve iniciar antes da curva vertical, como que anunciando-a ao usuário; na figura 3.9 estão ilustradas diversas combinações recomendáveis de curvas horizontais e verticais, observando-se que são válidas tanto para curvas horizontais à direita e à esquerda, como para curvas verticais côncavas e convexas;

FIGURA 3.9 – COORDENAÇÃO DE CURVAS HORIZONTAIS E VERTICAIS



### 3.5.2 Defeitos dos traçados

A combinação inadequada (ou não devidamente coordenada) dos elementos geométricos do projeto em planta e do projeto em perfil pode resultar no projeto de uma rodovia com trechos que não ofereçam condições satisfatórias de segurança e de conforto para os usuários, prejudicando a fluidez desejada para o trânsito veicular.

Algumas combinações desses elementos, em particular, produzem defeitos na geometria da rodovia que podem comprometer seriamente a qualidade do projeto, devendo ser evitadas pelo projetista.

As normas alemãs para o projeto geométrico de rodovias, adotadas pelo Departamento de Estradas de Rodagem de Santa Catarina (DER/SC), trazem considerações e ilustrações interessantes para o aprendizado dos efeitos que resultam nos traçados das rodovias em decorrência das combinações dos elementos em planta e em perfil.

Nas figuras 3.10 a 3.21 a seguir, construídas a partir de ilustrações contidas nas Diretrizes para a concepção de estradas (DER/SC, 1993 e DER/SC, 1999), estão representadas esquematicamente diversas combinações entre elementos geométricos do eixo e do grade, e os efeitos resultantes no traçado, em termos de visão em perspectiva oferecida para os usuários da rodovia.

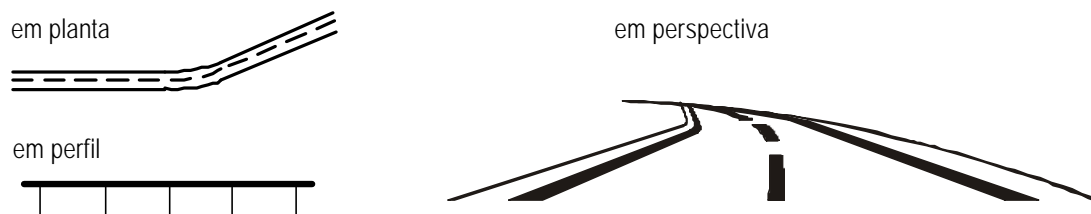
Nas citadas figuras, estão nominadas, nos casos pertinentes, as denominações dadas aos principais defeitos óticos espaciais que resultam da combinação (da superposição) dos elementos em planta e em perfil.

FIGURA 3.10 – PISTA SEM DOBRA ÓTICA



Fonte: Diretrizes para a construção de estradas : traçado das linhas, cap. 2 – DCE-T-2 (DER/SC, 1993, p. 9).

FIGURA 3.11 – PISTA COM DOBRA ÓTICA



Curvas de pequeno desenvolvimento entre tangentes devem ser evitadas, pois causam aparência de quebra de continuidade.

Fonte: Diretrizes para a construção de estradas : traçado das linhas, cap. 2 – DCE-T-2 (DER/SC, 1993, p. 9).

FIGURA 3.12 – DOBRAS E DEFEITOS ÓTICOS



Tangentes intermediárias curtas entre curvas de mesmo sentido devem ser evitadas, pois causam aparência de quebra de continuidade.

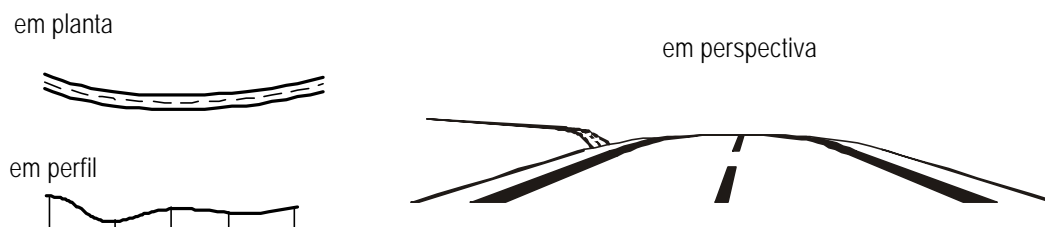
Fonte: Diretrizes para a construção de estradas : traçado das linhas, cap. 2 – DCE-T-2 (DER/SC, 1993, p. 8).

FIGURA 3.13 – DEFEITOS EM TRAÇADOS : MERGULHO EM TANGENTE



Fonte: Diretrizes para a concepção de estradas : condução do traçado – DCE-C (DER/SC, 1999, p. 37).

FIGURA 3.14 – DEFEITOS EM TRAÇADOS : MERGULHO EM CURVA



Fonte: Diretrizes para a construção de estradas : condução do traçado – DCE-C (DER/SC, 1999, p. 37).

FIGURA 3.15 – DEFEITOS EM TRAÇADOS : ABAULAMENTOS (TOBOGÃ)



Fonte: Diretrizes para a construção de estradas : condução do traçado – DCE-C (DER/SC, 1999, p. 36).

FIGURA 3.16 – DEFEITOS EM TRAÇADOS : ONDULAÇÕES NA CURVA



Fonte: Diretrizes para a concepção de estradas : condução do traçado – DCE-C (DER/SC, 1999, p. 36).

FIGURA 3.17 – DEFEITOS EM TRAÇADOS : MERGULHO RASO



Fonte: Diretrizes para a concepção de estradas : condução do traçado – DCE-C (DER/SC, 1999, p. 37).

FIGURA 3.18 – DEFEITOS EM TRAÇADOS : MERGULHO PROFUNDO



Fonte: Diretrizes para a concepção de estradas : condução do traçado – DCE-C (DER/SC, 1999, p. 37).

FIGURA 3.19 – DEFEITOS EM TRAÇADOS : SALTO



Fonte: Diretrizes para a concepção de estradas : condução do traçado – DCE-C (DER/SC, 1999, p. 38).



FIGURA 3.20 – DEFEITOS EM TRAÇADOS : SALTO COM DEFLEXÃO



Fonte: Diretrizes para a concepção de estradas : condução do traçado – DCE-C (DER/SC, 1999, p. 38).

FIGURA 3.21 – DEFEITOS EM TRAÇADOS : INÍCIO DA CURVA HORIZONTAL NA ÁREA CONVEXA



Fonte: Diretrizes para a concepção de estradas : condução do traçado – DCE-C (DER/SC, 1999, p. 36).

### 3.6 VEÍCULO DE PROJETO

Uma rodovia é projetada e construída, em princípio, visando possibilitar o seu uso, de forma segura e eficiente, por qualquer tipo de veículo automotor que seja autorizado a circular em vias públicas, obedecendo às disposições legais vigentes<sup>20</sup>.

Em função dos variados tipos de veículos autorizados a circular, e de suas diferentes características geométricas, mecânicas e de desempenho operacional, é necessário escolher um tipo de veículo que sirva de referência para a determinação dos valores máximos ou mínimos de parâmetros a serem observados para o projeto da rodovia.

O Código de Trânsito Brasileiro remeteu ao Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN) a competência para fixar as características, especificações básicas, configurações e condições para o registro, para o licenciamento e para a circulação de veículos nas vias públicas, tendo este órgão estabelecido<sup>21</sup> os seguintes limites referentes às dimensões e aos pesos para os veículos em trânsito livre:

- dimensões:
  - largura máxima = 2,60 m;
  - altura máxima = 4,40 m;
  - comprimento total :
    - veículos simples = 14,00 m;
    - veículos articulados = 18,15 m;
    - veículos com reboque = 19,80 m;

<sup>20</sup> No caso do Brasil, o trânsito de qualquer natureza nas vias terrestres do território nacional, abertas à circulação, é regido pelo Código de Trânsito Brasileiro, instituído pela Lei nº 9.503, de 23 set. 97, e alterações posteriores.

<sup>21</sup> Resolução nº 12, de 6 fev. 1998, do Conselho Nacional de Trânsito.

- peso bruto:
  - total, por unidade ou por combinação de veículos = 45 t;
  - por eixo isolado = 10 t;
  - por conjunto de 2 eixos em tandem = 17 t;
  - por conjunto de 2 eixos não em tandem = 15 t.

A escolha de um veículo com a configuração máxima permitida, ou de um modelo particular de veículo que mais se aproximasse dessa configuração limite para fins de referenciamento de projetos, sem considerações adicionais, não seria razoável, pois levaria a inconsistências ou a exageros de dimensionamento.

Assim, as normas de projeto procuram agrupar as diferentes espécies de veículos automotores em um número limitado de *tipos de veículos*, cada um dos quais abrangendo veículos com características gerais similares.

Para cada tipo de veículo, as normas definem as características de um veículo representativo, permitindo o estabelecimento de parâmetros de projeto a serem observados para que a rodovia possa atender adequadamente aos veículos desse tipo.

As Normas do DNER estabelecem, para fins de projeto, os 4 seguintes tipos básicos de veículos, que correspondem a parte dos utilizados pela AASHTO<sup>22</sup>, apenas com as denominações modificadas:

- veículo tipo VP, denominado genericamente por *Veículo de Passageiros*, compreendendo veículos leves, assimiláveis em termos geométricos e operacionais ao automóvel, incluindo *vans*, utilitários, *pick-up's*, furgões e similares;
- veículo tipo CO, denominado genericamente por *Veículo Comercial Rígido*, composto por unidade tratora simples (veículo não articulado), incluindo caminhões e ônibus convencionais, normalmente de 2 eixos e 6 rodas;
- veículo tipo O, denominado genericamente por *Ônibus de Longo Percurso*, abrangendo veículos comerciais rígidos de maiores dimensões, incluindo ônibus de turismo e caminhões longos, geralmente com 3 eixos ("trucão"), de dimensões maiores que o veículo tipo CO, com comprimentos próximos ao do limite máximo para veículos simples;
- veículo tipo SR, denominado genericamente por *Semi-Reboque*, representando os veículos comerciais articulados, com comprimento próximo ao limite para veículos articulados, sendo constituídos normalmente de uma unidade tratora simples com um semi-reboque.

As dimensões básicas dos veículos representativos dos diferentes tipos considerados para fins de projeto estão discriminadas na tabela 3.1.

TABELA 3.1 – DIMENSÕES BÁSICAS DOS VEÍCULOS DE PROJETO

CARACTERÍSTICAS	TIPOS DE VEÍCULOS			
	VP	CO	O	SR
Largura total do veículo (m)	2,10	2,60	2,60	2,60
Comprimento total do veículo (m)	5,80	9,10	12,20	16,80
Raio mín. roda externa dianteira (m)	7,30	12,80	12,80	13,70
Raio mín. roda interna traseira (m)	4,70	8,70	7,10	6,00

Fonte: Manual de projeto geométrico de rodovias rurais (DNER, 1999, p. 47).

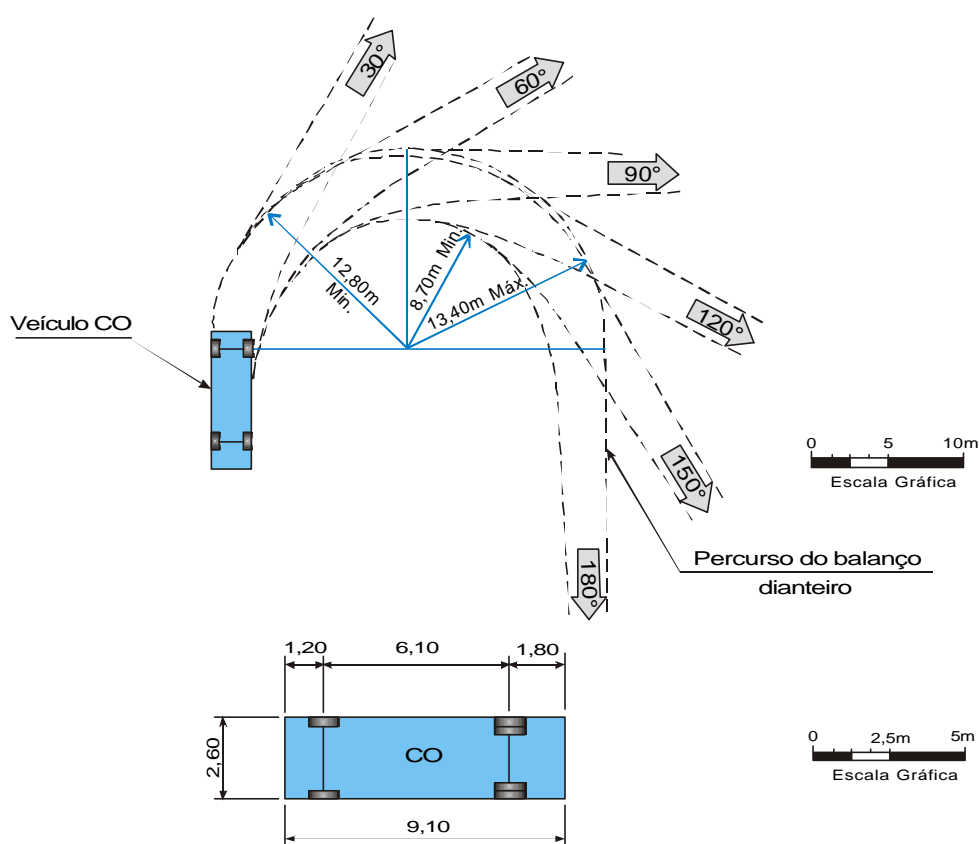
<sup>22</sup> Os tipos básicos fixados pelas Normas do DNER – VP, CO, O e SR – correspondem, respectivamente, aos veículos tipo P (*Passenger car*), SU (*Single Unit Truck*), BUS (*Single Unit Bus*) e WB-15 (*Semi-trailer Combination Large*) fixados pela AASHTO, que considera, ainda, outros tipos de veículos.

Os parâmetros de projeto geométrico estabelecidos pelas normas do DNER consideram o caso geral de atendimento aos veículos tipo CO.

Rodovias projetadas geometricamente para o atendimento a esse tipo de veículo atendem com bastante folga aos veículos do tipo VP, atendem satisfatoriamente aos veículos do tipo O, e atendem aos veículos do tipo SR em condições aquém das desejáveis, mas com restrições no geral aceitáveis.

Na figura 3.22, estão representadas, em escala gráfica indicada, as dimensões e as trajetórias mínimas<sup>23</sup> dos elementos (ou pontos) significativos do veículo tipo CO, que servem para fins de projeto e de verificação de dispositivos geométricos de rodovias - tais como retornos e interseções - onde ocorre a necessidade de canalizações ou balizamentos para o percurso dos veículos.

FIGURA 3.22 – DIMENSÕES E GABARITOS DE GIRO : VEÍCULO TIPO CO

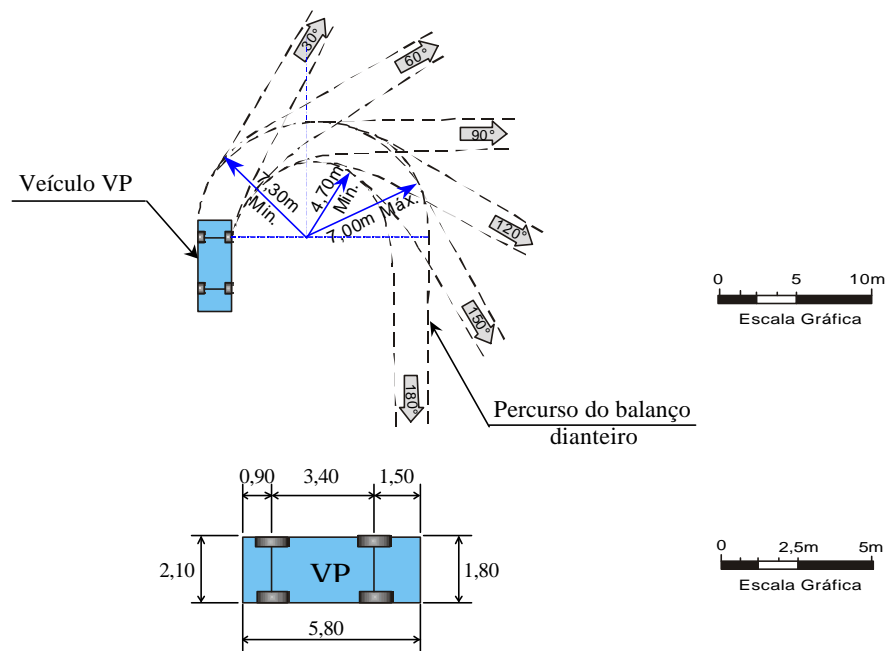


Fonte: Manual de projeto geométrico de rodovias rurais (DNER, 1999, p. 48)

Gabaritos de giro similares, correspondentes aos veículos tipo VP, O e SR, estão apresentados nas figuras 3.23, 3.24 e 3.25, respectivamente, podendo ser copiados em transparências para aplicação nos casos específicos.

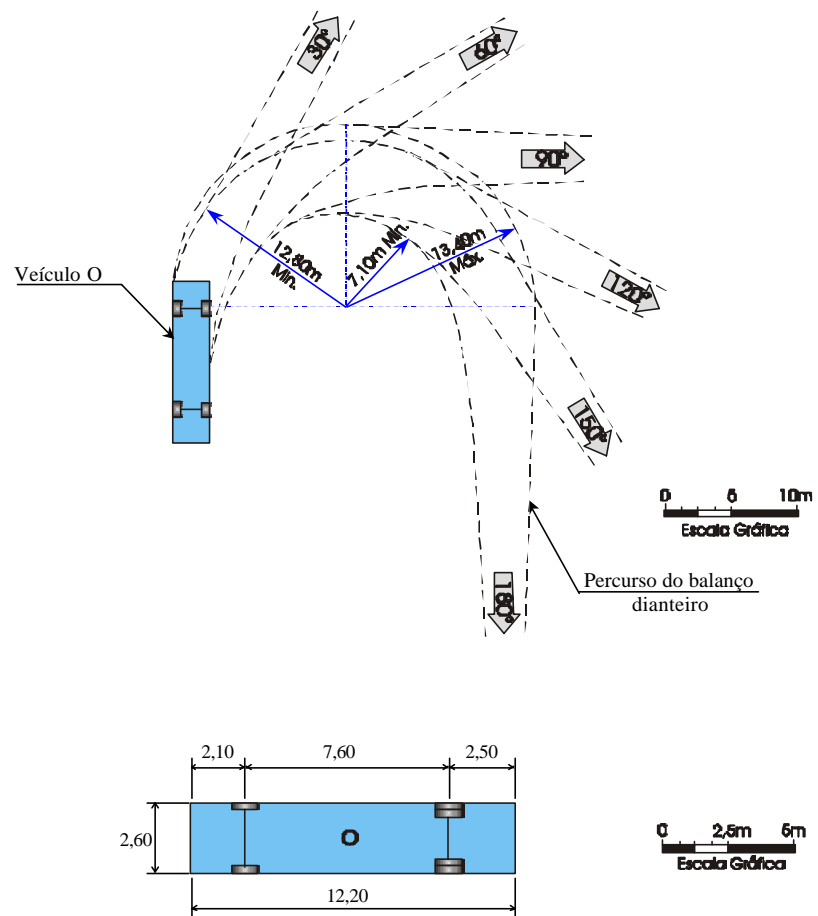
<sup>23</sup> Na figura, estão representadas as trajetórias que correspondem ao caso de veículos transitando em velocidades muito baixas (abaixo de 15 km/h); outras podem ser construídas considerando diferentes velocidades de percurso, para aplicação aos casos de canalizações que permitam o trânsito de veículos nessas velocidades.

FIGURA 3.23 – DIMENSÕES E GABARITOS DE GIRO : VEÍCULO TIPO VP



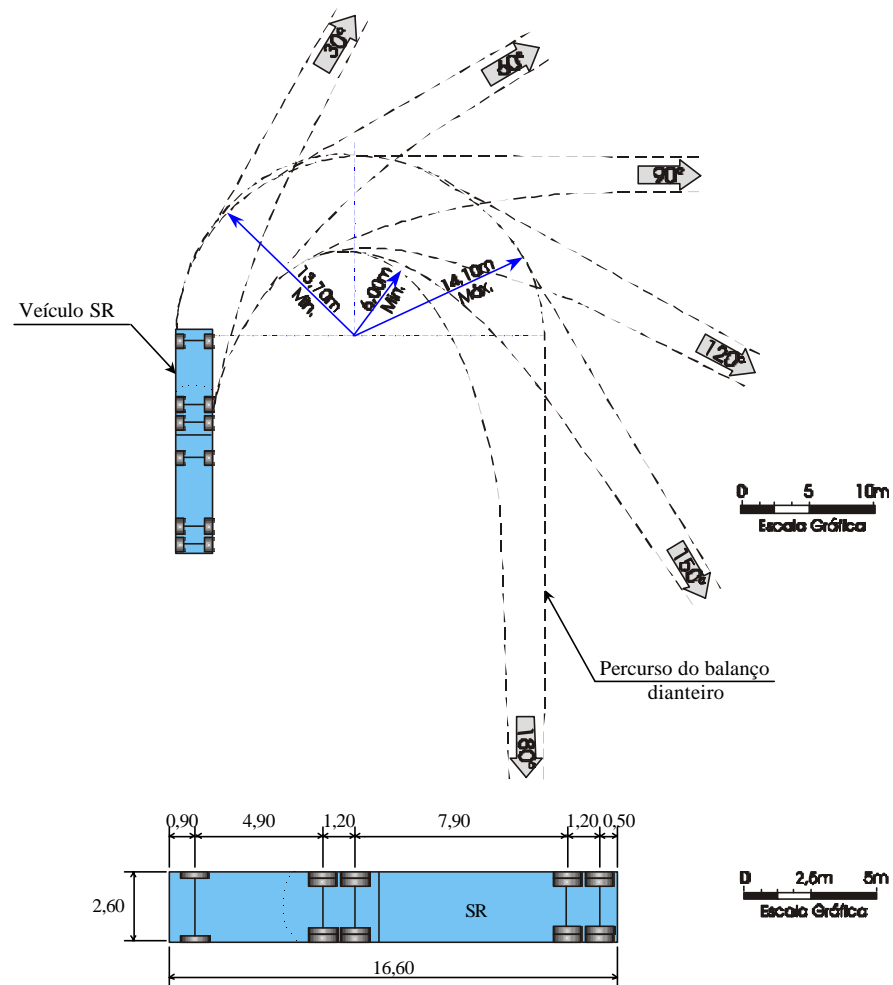
Fonte: Manual de projeto geométrico de rodovias rurais (DNER, 1999, p. 48)

FIGURA 3.24 – DIMENSÕES E GABARITOS DE GIRO : VEÍCULO TIPO O



Fonte: Manual de projeto geométrico de rodovias rurais (DNER, 1999, p. 49)

FIGURA 3.25 – DIMENSÕES E GABARITOS DE GIRO : VEÍCULO TIPO SR



Fonte: Manual de projeto geométrico de rodovias rurais (DNER, 1999, p. 50)

A consideração de um ou de outro tipo de veículo para fins de balizamento do projeto geométrico de uma rodovia depende fundamentalmente da finalidade da rodovia e dos volumes (e composições) previstos para o tráfego a ser por ela atendido.

Uma rodovia destinada a atender uma área de lazer, para visitação por turistas, permitindo apenas o trânsito de carros de passageiros (e não de ônibus nem de "trailers"), poderia ser dimensionada para veículos do tipo VP, reduzindo bastante o custo de construção; não obstante, as características geométricas da rodovia deveriam ser verificadas para permitir o trânsito, embora em horários apropriados e em caráter precário, de veículos de carga (para suprimentos e serviços), e para permitir a passagem de veículos especiais (ambulâncias e carros de bombeiros, por exemplo) para atendimento a eventuais emergências.

Já no caso de uma rodovia em que o tráfego a ser atendido apresentasse elevada incidência de veículos pesados, do tipo semi-reboque, por exemplo, o projeto geométrico da rodovia deveria ser dimensionado para veículos do tipo SR, pois não seria lógico projetar e construir a rodovia de forma a que uma parcela significativa de seus usuários resultasse atendida em condições aquém das desejáveis.

A definição do veículo tipo para o referenciamento do projeto geométrico de uma rodovia é uma questão que deve levar em conta não somente a eficiência técnica do projeto, mas também a eficiência econômica a ele associada.









## 4

## ELEMENTOS PLANIMÉTRICOS

A Geometria existe, como já disse o filósofo, por toda parte.  
 É preciso, porém, olhos para vê-la, inteligência para compreendê-la e alma para admirá-la.  
 O beduíno rude vê as formas geométricas, mas não as entende; o sunita entende-as, mas não as admira; o artista, enfim, enxerga a perfeição das figuras, compreende o Belo e admira a Ordem e a Harmonia!  
 Deus foi o grande geômetra. Geometrizou a Terra e o Céu.

MALBA TAHAN. **O homem que calculava**. 33 Ed. Rio de Janeiro : Record, 1987.

## 4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

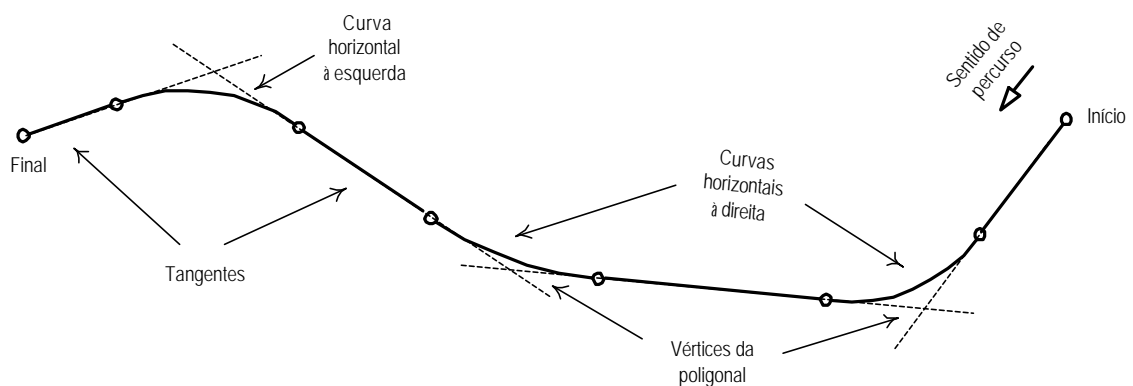
Neste capítulo serão tratados assuntos referentes ao projeto do traçado de uma rodovia em planta, ou seja, ao projeto do eixo de uma rodovia.

Como já comentado anteriormente, o eixo de uma rodovia pode ser imaginado como sendo constituído por uma poligonal aberta, orientada, cujos alinhamentos são concordados, nos vértices, por curvas horizontais.

Assim, o eixo compreenderá trechos retos e curvos; na terminologia de projeto geométrico, os trechos retos do eixo são denominados por *tangentes* (não sendo chamados de "retas").

Como o eixo é orientado, isto é, tem um ponto de origem e um sentido de percurso definidos, as curvas horizontais podem ser curvas à direita ou à esquerda, conforme o sentido de desenvolvimento das curvaturas.

Na figura 4.1 está representado esquematicamente o eixo de uma rodovia, com a indicação dos elementos acima referidos.



No projeto dos elementos planimétricos, a exemplo dos procedimentos topográficos, as distâncias são sempre tomadas horizontalmente, sendo expressas em metros, com a precisão padronizada de 0,01 m.

## 4.2 ESTAQUEAMENTO

Para fins de caracterização dos elementos que constituirão a rodovia, estes deverão ter sua geometria definida, pelo projeto, em pontos sucessivos ao longo do eixo, pontos esses que servirão, inclusive, para fins de posterior materialização do eixo projetado e dos demais elementos constituintes da rodovia no campo.

Esses pontos, denominados genericamente de *estacas*, são marcados a cada 20,00m de distância a partir do ponto de início do projeto e numerados seqüencialmente, sendo o processo conhecido como *estaqueamento* do eixo.

O ponto de início do projeto constitui a *estaca 0* (zero), sendo convencionalmente representada por  $0 = PP$  (estaca zero = Ponto de Partida); os demais pontos, equidistantes de 20,00 m, constituem as *estacas inteiras*, sendo denominadas seqüencialmente, por *estaca 1*, *estaca 2*, ... e assim sucessivamente.

Qualquer ponto do eixo pode ser referenciado a esse estaqueamento, sendo sua posição determinada pela designação da estaca inteira imediatamente anterior à posição do ponto, acrescida da distância (em metros, com precisão de 0,01 m) desta estaca inteira até o ponto considerado.

A marcação das estacas ao longo das tangentes não oferece dificuldades maiores, pois não ocorre perda de precisão teórica quando se medem distâncias ao longo de retas.

Já nos trechos em curva ocorre alguma perda de precisão, pois as medidas de distâncias são sempre tomadas ao longo de segmentos retos, na marcação das posições das estacas com os recursos normais da topografia, ao passo que as distâncias reais (assim como as de projeto) entre as estacas correspondem a arcos de curvas.

Visando minimizar esses erros de mensuração e de referenciamento dos trechos curvos do eixo, as Normas do DNER estabelecem a obrigatoriedade de se marcar, nos trechos em curva, além dos pontos correspondentes às estacas inteiras, outros pontos – correspondentes a estacas intermediárias – de forma a melhorar a precisão na caracterização do eixo nas curvas<sup>24</sup>.

A marcação das curvas considerando apenas as estacas inteiras corresponde à materialização de pontos das curvas por meio de cordas de 20,00 m. Para evitar diferenças significativas entre os comprimentos dessas cordas e as extensões dos correspondentes arcos de curvas, o DNER recomenda a caracterização dos trechos curvos com cordas de 20,00 m somente para raios de curva superiores a 600,00 m.

Trechos curvos com raios menores que esse valor, mas superiores a 100,00 m, deverão ser marcados por meio de pontos distantes não mais de 10,00 m entre si. Nesses casos, deverão ser marcados, nos trechos curvos, além dos pontos correspondentes às estacas inteiras, também os pontos correspondentes a estacas fracionárias, múltiplas de 10,00 m.

Quando os raios de curva são inferiores a 100,00 m, os comprimentos máximos de corda são fixados em 5,00 m, devendo ser caracterizados, nos trechos curvos, pontos correspondentes às estacas inteiras e às estacas fracionárias múltiplas de 5,00 m.

Essas condições estão resumidas na tabela 4.1 a seguir.

TABELA 4.1 – CORDAS ADMISSÍVEIS PARA AS CURVAS

RAIOS DE CURVA (R)	CORDA MÁXIMA (c)
$R < 100,00 \text{ m}$	5,00 m
$100,00 \text{ m} < R < 600,00 \text{ m}$	10,00 m
$R > 600,00 \text{ m}$	20,00 m

Fonte: Manual de projeto de engenharia rodoviária (DNER, 1974, v. 3, cap. 9, p. 4).

<sup>24</sup> O uso de estacas intermediárias pode ser recomendável também nos casos de projetos em regiões muito acidentadas, onde haja necessidade de maior precisão, principalmente em função dos volumes de terraplenagem envolvidos.

Observe-se que a caracterização de trechos curvos do eixo por meio de cordas menores que 20,00 m demanda a marcação de pontos adicionais, correspondentes a estacas fracionárias, mas não altera o conceito de estaqueamento do eixo, nem modifica as posições dos demais pontos do eixo. No entanto, os trechos curvos resultam definidos com maior precisão.

Outra forma de notação para referenciamento de pontos ao longo do eixo é a denominada *notação quilométrica*, na qual a posição de um ponto é dada indicando-se a sua distância à origem, pelo número inteiro de quilômetros, acrescido da fração, em metros, com a precisão convencional, isto é, de 0,01 m. Ambas as formas são equivalentes, resultando na mesma precisão.

Imagine-se, por exemplo, que no projeto de um eixo de rodovia, uma das cabeceiras de um viaduto estivesse localizada a 5.342,87 m da origem.

Esta cabeceira, utilizando o método convencional de estaqueamento para o seu posicionamento, estaria localizada na estaca 267 + 2,87 m.

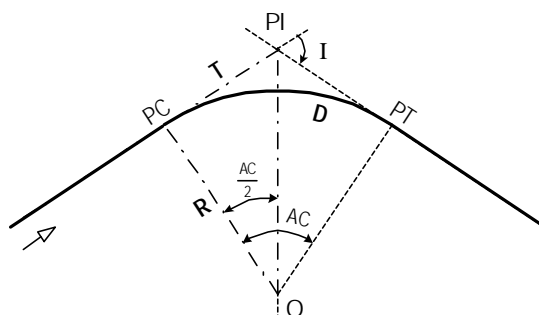
Utilizando a notação quilométrica, a cabeceira estaria localizada no km 5 + 342,87 m.

### 4.3 CONCORDÂNCIA COM CURVA CIRCULAR SIMPLES

Para a concordância de dois alinhamentos retos que se interceptam em um vértice, utiliza-se geralmente, no projeto geométrico de rodovias, a curva circular. Esta preferência é devida às boas propriedades que a curva circular oferece tanto para tráfego, pelos usuários da rodovia, como para o próprio projeto da curva e para a sua posterior materialização no campo, por processos de locação.

Na figura 4.2 está representado o esquema de uma concordância com curva circular simples, estando também assinalados os elementos técnicos característicos.

FIGURA 4.2 – ESQUEMA DA CONCORDÂNCIA COM CURVA CIRCULAR SIMPLES



A notação convencionalmente utilizada para os elementos característicos das concordâncias com curvas circulares simples, as denominações desses elementos e as respectivas unidades de medida, são as seguintes:

- PI : Ponto de Interseção;
- PC : Ponto de Curva<sup>25</sup>;
- PT : Ponto de Tangente;
- I : Ângulo de deflexão;
- AC : Ângulo Central;
- T : Tangente Externa ou Exterior (m);
- D : Desenvolvimento (ou comprimento) da curva circular (m);
- R : Raio da curva circular (m);
- O : Centro da curva circular.

<sup>25</sup> Alguns projetistas utilizam a notação PCE ou PCD para assinalar quando se trata de uma concordância com curva circular à esquerda ou à direita, respectivamente.

### 4.3.1 Cálculo da Concordância

Ao se projetar uma concordância horizontal, parte-se do conhecimento dos elementos da poligonal, dentre os quais interessam de imediato os comprimentos dos alinhamentos e os ângulos de deflexão nos vértices.

Observe-se que, na concordância com curva circular simples, o Ângulo Central (AC) é sempre numericamente igual à deflexão (I), ou seja:

$$AC = I \quad [4.1]$$

Assim, o elemento que falta para a definição geométrica da concordância é o raio da curva circular a ser utilizada.

Em princípio, quanto maior for o raio da curva circular, melhor será a concordância para o usuário, pois a curva resultará mais suave, com melhores condições de visibilidade.

Mas há limitações de ordem prática, que apontam para um valor limite de 5.000,00 m para o raio, pois a experiência mostra que curvas com raios superiores a esse teto tendem a se confundir visualmente com tangentes e dificultam a manutenção dos veículos na trajetória curva, devido à sensibilidade mecânica do procedimento de mudança de direção dos veículos.

As Normas do DNER estabelecem também, para cada classe de projeto e para as diferentes condições de relevo da região atravessada (que condicionam as velocidades diretrizes de projeto), os valores de raios mínimos a serem observados nos projetos das concordâncias horizontais, observadas as superelevações máximas recomendadas para cada caso (vide valores constantes nas tabelas 2.3, 2.4 e 2.5).

Obedecidos esses limites, o raio de curvatura a ser adotado para uma concordância horizontal é estabelecido, em geral, pelas condições topográficas locais, procurando-se projetar curvas suaves, observadas as relações recomendadas entre os raios de curvas adjacentes<sup>26</sup>, mas de forma a ajustar o traçado da rodovia à configuração do terreno, procurando minimizar as intervenções que se farão necessárias, em termos de escavações e aterros a serem executados para a construção da rodovia.

Fixado o raio de curva, a concordância poderá ser calculada analiticamente, definindo-se primeiramente o valor da tangente exterior (T) e, após, os valores dos demais parâmetros da concordância.

Da figura 4.2, onde se traçou a bissetriz do ângulo central, na concordância horizontal com curva circular simples, pode-se deduzir de imediato as seguintes expressões, que permitem o cálculo da tangente exterior e do desenvolvimento em curva:

$$T = R \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{AC}{2}\right) \quad [4.2]$$

e

$$D = AC \cdot R \quad [4.3]$$

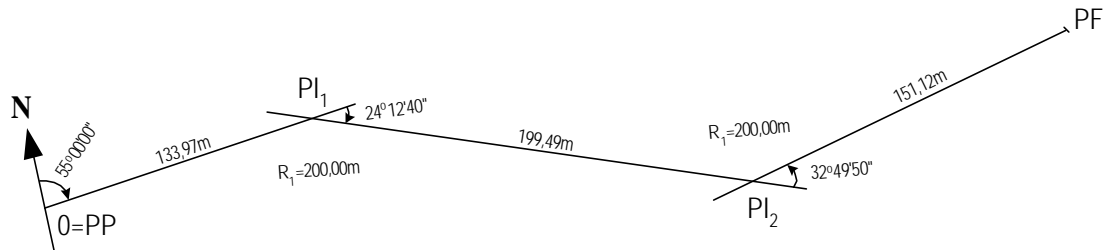
onde:

- T : tangente exterior (m);
- R : raio da curva circular (m);
- AC : ângulo central (lembrando que é numericamente igual à deflexão I);
- D : desenvolvimento em curva (m).

**EXEMPLO 4.1** : Para ilustrar o procedimento de cálculo de concordâncias com curvas circulares simples, imagine-se o projeto de um eixo, com os alinhamentos definidos na forma da figura 4.3, no qual se queira efetuar as concordâncias com os raios de curva  $R_1 = 200,00$  m e  $R_2 = 250,00$  m.

<sup>26</sup> Vide figura 3.8 para estabelecer os raios de curvas consecutivas.

FIGURA 4.3 – ALINHAMENTOS PARA CÁLCULO DE CONCORDÂNCIAS



Utilizando as fórmulas [4.1], [4.2] e [4.3], obtém-se:

$$T_1 = 200,00 \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{24^{\circ}12'40''}{2}\right) = 42,90\text{m};$$

$$D_1 = (24^{\circ}12'40'') \cdot \frac{\pi}{180^{\circ}} \cdot 200,00 = 84,51\text{m};$$

$$T_2 = 250,00 \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{32^{\circ}49'50''}{2}\right) = 73,65\text{m};$$

$$D_2 = (32^{\circ}49'50'') \cdot \frac{\pi}{180^{\circ}} \cdot 250,00 = 143,25\text{m}.$$

Conhecidos esses valores, pode-se calcular os comprimentos das tangentes, ou seja, dos alinhamentos da poligonal excluídos das tangentes exteriores; pode-se, então, calcular as distâncias da origem até os pontos singulares do eixo (PC<sub>1</sub>, PT<sub>1</sub>, PC<sub>2</sub>, PT<sub>2</sub> e PF), determinando-se as estacas (ou, alternativamente, o posicionamento quilométrico) desses pontos.

Calculando-se diretamente o estaqueamento, no caso do projeto exemplificado, chega-se aos seguintes valores:

$$PC_1 = \overline{0 - PI_1} - T_1 = 133,97 - 42,90 = 91,07\text{m} \equiv 4 + 11,07\text{m};$$

$$PT_1 = PC_1 + D_1 = 4 + 11,07\text{m} + 84,51\text{m} \equiv 8 + 15,58\text{m};$$

$$PC_2 = PT_1 + (\overline{PI_1 - PI_2} - T_1 - T_2) = 8 + 15,58\text{m} + (199,49\text{m} - 42,90\text{m} - 73,65\text{m}) \equiv 12 + 18,52\text{m};$$

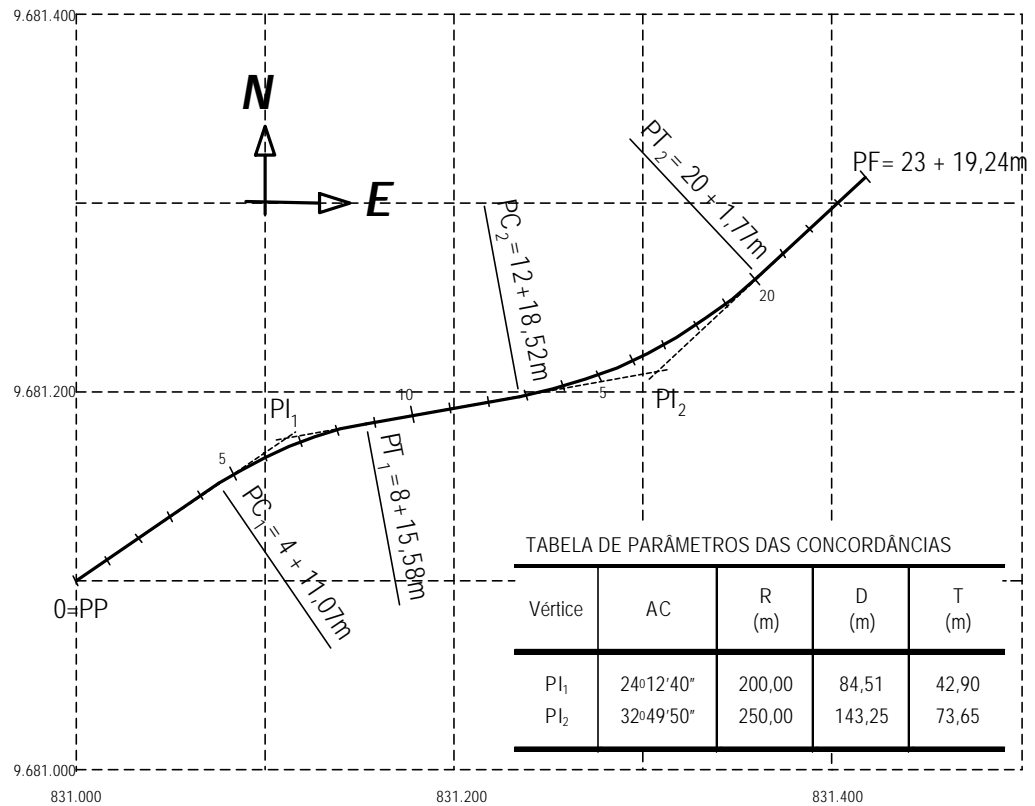
$$PT_2 = PC_2 + D_2 = 12 + 18,52\text{m} + 143,25\text{m} \equiv 20 + 1,77\text{m};$$

$$PF = PT_2 + (\overline{PI_2 - PF} - T_2) = 20 + 1,77\text{m} + (151,12\text{m} - 73,65\text{m}) \equiv 23 + 19,24\text{m}.$$

Na figura 4.4 está representado o eixo projetado com as concordâncias acima calculadas, desenhado de acordo com as convenções recomendadas pelo DNER, na forma indicada pelo Manual de serviços de consultoria para estudos e projetos rodoviários (DNER, 1978, vol. 2).

Observe-se, nessa figura, que o desenho do eixo está referenciado a um sistema reticulado, orientado segundo as direções N-S e E-W, e que junto ao desenho está incluída uma tabela contendo os valores dos parâmetros das concordâncias horizontais.

FIGURA 4.4 – DESENHO DO EIXO PROJETADO



#### 4.3.2 Locação de curvas circulares

O desenho em escala do eixo projetado é tarefa relativamente simples, bastando representar com precisão gráfica os alinhamentos, neles marcando as posições dos pontos singulares, e desenhar as curvas com auxílio de compasso, caso se esteja procedendo manualmente.

Já o "desenho" do eixo projetado em escala real, no campo, consiste na marcação de pontos representativos do eixo, materializados por meio de piquetes (ou estacas) cravados no terreno, posicionados com precisão topográfica.

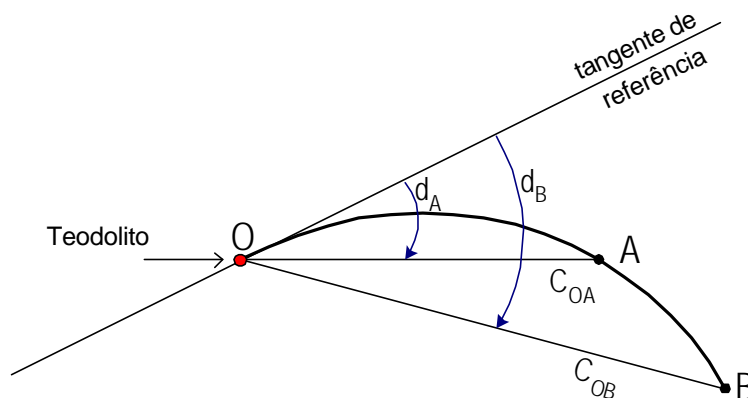
O processo de materialização de pontos do eixo no terreno é denominado de *locação do eixo*.

A materialização dos alinhamentos retos e locação das tangentes não oferece dificuldades maiores, pois consiste basicamente na medida de ângulos e de distâncias ao longo de alinhamentos retos.

Mas a locação dos trechos em curva deve ser feita por método apropriado, já que não é praticável "riscar" a curva no terreno com auxílio de algum compasso, e nem se conseguem visadas curvas ou marcação de distâncias curvas com os recursos da topografia.

Dentre os processos usuais para essa finalidade, pratica-se, no meio rodoviário brasileiro, o denominado processo de *locação por deflexões acumuladas*, que consiste basicamente, como indicado na figura 4.5, no posicionamento de pontos da curva a partir das medidas dos ângulos de deflexão em relação à tangente à curva onde está instalado o teodolito, e das respectivas distâncias, medidas ao longo da curva, desde o teodolito até os pontos em questão.

FIGURA 4.5 – LOCAÇÃO POR DEFLEXÕES ACUMULADAS



Este processo demandaria, teoricamente, a medida de distâncias ao longo das curvas, que pode ser feita, com precisão aceitável, fixando-se um número razoável de pontos da curva e medindo-se as cordas entre os pontos ao invés dos arcos.

Conforme já comentado, a precisão resulta aceitável, para os fins práticos, quando se marcam as curvas com pontos que compreendam cordas não superiores a 20,00m, a 10,00m ou a 5,00m, dependendo dos raios das curvas, de acordo com o indicado na tabela 4.1.

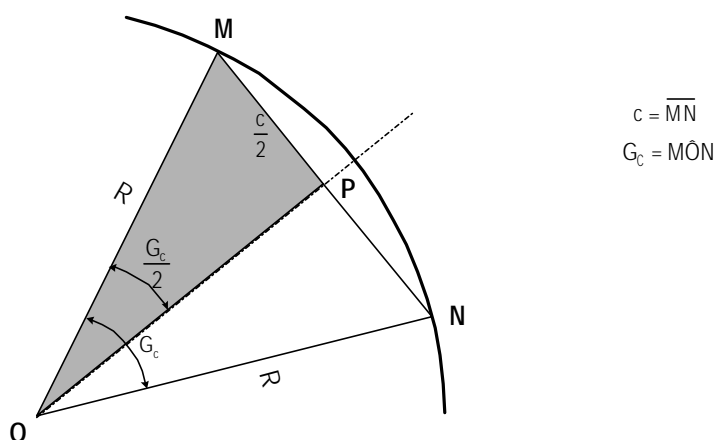
Dentre os elementos que fundamentam o desenvolvimento de cálculos pertinentes a locações de curvas circulares, é útil entender os conceitos de *Grau de curva*, de *Deflexão de uma corda* e de *Deflexão por metro*, que serão detalhados a seguir.

#### I - Grau de uma curva

O Grau de uma curva ( $G_c$ ) para uma determinada corda ( $c$ ) é, por definição, o ângulo central que corresponde à corda considerada.

Na figura 4.6 está representada uma corda ( $c$ ) de arco de círculo de raio  $R$ , a qual compreende um ângulo central ( $G_c$ ), que é o grau da curva para a corda considerada.

FIGURA 4.6 – GRAU DA CURVA CIRCULAR PARA UMA CORDA C



Traçando-se a bissetriz desse ângulo, define-se o triângulo retângulo OMP, a partir do qual se pode estabelecer a seguinte relação:

$$\operatorname{sen}\left(\frac{G_c}{2}\right) = \frac{\overline{MP}}{R} = \frac{c/2}{R}$$

ou

$$G_c = 2 \cdot \operatorname{arc. sen}\left(\frac{c}{2} \cdot R\right) \quad [4.4]$$

O grau de uma curva para uma dada corda  $c$  é uma forma alternativa de definir a geometria de uma curva circular.

**EXEMPLO 4.2:** Na concordância projetada para o PI<sub>1</sub>, no exemplo 4.1, foi utilizada uma curva circular com raio  $R_1 = 200,00\text{m}$ , para o qual deve ser considerada, como já visto, corda de  $10,00\text{m}$ .

Utilizando a fórmula [4.4], pode ser determinado o grau da curva para essa corda, representado por  $G_{10}$ , qual seja:

$$G_{10} = 2 \cdot \operatorname{arc. sen}\left(\frac{10,00}{2 \cdot 200,00}\right) = 2,865.09^\circ \cong 2^\circ 51' 54''$$

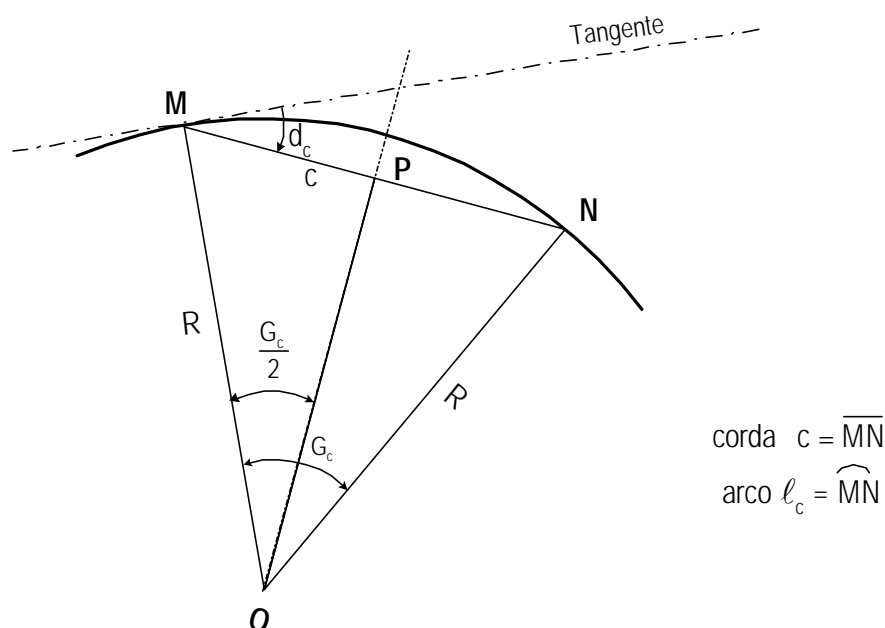
Observe-se que, geometricamente, é indiferente dizer que a curva circular do exemplo tem raio  $R = 200,00\text{m}$  ou que tem grau (para a corda de  $10,00\text{m}$ )  $G_{10} = 2^\circ 51' 54''$ .

## II - Deflexões de uma curva circular

A deflexão ( $d_c$ ) de uma curva circular, para uma corda ( $c$ ) é, por definição, o ângulo formado entre essa corda e a tangente à curva em uma das extremidades da corda.

Na figura 4.7 está representado um arco de círculo de raio  $R$  e uma corda de comprimento  $c$ , dada pelo segmento de reta  $MN$ . Estão também representadas a bissetriz do ângulo central compreendido pela corda (que, como já visto, é o grau  $G_c$ ), e a tangente à curva pela extremidade  $M$  da corda.

FIGURA 4.7 – DEFLEXÃO DA CURVA CIRCULAR PARA UMA CORDA  $c$





A deflexão da curva para essa corda, conforme se assinala na figura, é o ângulo  $d_c$  – que é considerado, em princípio, um ângulo orientado, com origem na tangente (no caso esquematizado na figura, tratar-se-ia de uma deflexão à direita).

Sendo a tangente perpendicular ao raio e a bissetriz perpendicular à corda, o ângulo de deflexão resulta sempre numericamente igual à metade do ângulo central correspondente à corda, conforme se pode visualizar na figura 4.7, ou seja:

$$d_c = \frac{G_c}{2} \quad [4.5]$$

Em projeto geométrico, como já visto, dentro dos limites de raios e de comprimentos de cordas fixados pelas normas, é permitido se confundir o comprimento de uma corda com o comprimento do arco da curva que lhe corresponde; ou seja, pode-se confundir os comprimentos da corda ( $c$ ) e do arco ( $\ell_c$ ), representados na figura 4.7, resultando indiferente referir-se à deflexão da curva para a corda  $c$  ou à deflexão da curva para o arco  $\ell_c$ .

Assim, embora não seja matematicamente exato, considera-se que a deflexão para um arco de 5,00 m, de 10,00 m ou de 20,00 m (conforme o raio da curva), seja igual, respectivamente, à deflexão para uma corda de 5,00 m, de 10,00 m ou de 20,00 m.

**EXEMPLO 4.3** : O grau da curva circular de raio  $R = 200,00$  m é  $G_{10} = 2^\circ 51' 54''$ , conforme visto no exemplo 4.2. A deflexão para uma corda de 10,00 m resulta, portanto (fórmula [4.5]):

$$d_{10} = \frac{G_{10}}{2} = \frac{2^\circ 51' 54''}{2} = 1^\circ 25' 57''$$

Esse será o valor considerado, para fins de projeto e de locação, da deflexão correspondente a um arco de 10,00 m da curva circular de raio  $R = 200,00$  m.

Observe-se que o cálculo matematicamente correto da deflexão para um arco de 10,00 m da curva considerada, expressa com precisão de 1 segundo e arredondada para o inteiro mais próximo, resultaria no mesmo valor, de  $1^\circ 25' 57''$  (verifique isso!).

Dada a diferença em geral desprezível que resulta, adota-se, em projeto geométrico, observadas as cordas máximas recomendadas na tabela 4.1, a definição de deflexão de uma corda (ao invés de deflexão de um arco de curva) nos cálculos de ângulos para fins de locação.

### III - Deflexão por metro

Na locação de uma curva circular, é freqüente a necessidade de se determinar valores de deflexão da curva para arcos fracionários, ou seja, não coincidentes com os valores "inteiros" de 5,00 m, de 10,00 m ou de 20,00 m.

Visando facilitar o cálculo de deflexões para os arcos fracionários, define-se a deflexão por metro ( $d_m$ ) como sendo o valor da deflexão correspondente ao arco (ou à corda) de 1,00 m, calculando o seu valor, de forma simplificada, em proporção direta ao da deflexão correspondente à corda inteira.

Ou seja, sendo  $d_c$  o valor da deflexão para uma corda  $c$ , o valor da deflexão por metro é dado por:

$$d_m = \frac{d_c}{c} \quad [4.6]$$

**EXEMPLO 4.4** : O valor da deflexão por metro para a curva circular com raio  $R = 200,00$  m utilizado na concordância projetada para o  $PI_1$ , no caso do exemplo 4.1, calculado por meio da fórmula [4.6], resulta:

$$d_m = \frac{d_{10}}{10,00} = \frac{1^\circ 25' 57''}{10,00} = 0^\circ 08' 36''$$

Também este valor, embora seja teoricamente inexato<sup>27</sup>, resulta com diferenças desprezíveis em relação ao valor correto, nos casos práticos. No exemplo 4.4, o valor corretamente calculado da deflexão por metro, expresso com precisão de 1 segundo, arredondado para o inteiro mais próximo, resultaria evidentemente o mesmo (como se pode justificar esta afirmação?).

Essa forma aproximada de se definir uma deflexão unitária permite que se determine, com precisão aceitável, o valor da deflexão ( $d_\ell$ ) que corresponde a um arco de comprimento  $\ell$  mediante simples proporção, por meio da fórmula:

$$d_\ell = \ell \cdot d_m \quad [4.7]$$

A fórmula [4.7] pode ser também aplicada para qualquer valor de comprimento ( $\ell$ ) do arco, mesmo para valores de  $\ell$  maiores que o da corda inteira tomada como referência; atente-se, no entanto, que erros significativos poderão se acumular no cálculo das deflexões correspondentes a arcos crescentes, por essa fórmula, caso o valor da deflexão por metro não tenha resultado exato, isto é, caso tenha sido calculado com algum arredondamento no final (como foi o caso do exemplo anteriormente calculado).

### 4.3.3 Métodos de locação

O conhecimento dos conceitos vistos, de grau curva para uma corda  $c$  ( $G_c$ ), de deflexão para uma corda  $c$  ( $d_c$ ), e de deflexão para um arco  $\ell$  ( $d_\ell$ ), permite o imediato entendimento das facilidades que o processo de locação por deflexões acumuladas oferece em relação a outros processos para a locação de curvas circulares, tais como, por exemplo, os de locação por coordenadas cartesianas ou por coordenadas polares.

Na prática, ao se proceder à locação de uma curva circular projetada, inicia-se a locação por uma das extremidades da curva circular, instalando-se o teodolito no PC<sup>28</sup> e tomando-se a direção da tangente como referência ou origem para a contagem dos ângulos de deflexão.

Como o PC (bem assim o PT) resultam geralmente em pontos correspondentes a estacas fracionárias (vide o caso do exemplo 4.1), e dado que a curva deverá ser marcada por pontos que compreendam cordas menores que as cordas máximas ( $c$ ) permitidas para os diferentes raios, ocorrerão duas hipóteses de marcação de pontos da curva:

- a) marcam-se, a partir do PC, pontos equidistantes, compreendendo cordas (arcos) iguais à corda ( $c$ ) recomendada para o raio da curva circular; isto resultará na locação de pontos correspondente a estacas fracionárias, sendo por isso este método de locação denominado de *locação por estaca fracionária*;
- b) marcam-se, a partir do PC, pontos correspondentes às estacas inteiras ou fracionárias, múltiplas do valor equivalente ao da corda ( $c$ ) recomendada para o raio da curva circular; como são locados os pontos correspondentes às estacas inteiras (e múltiplas de valores inteiros da corda  $c$ ), este método de locação é denominado de *locação por estaca inteira*.

#### 4.3.3.1 Locação por estaca fracionária

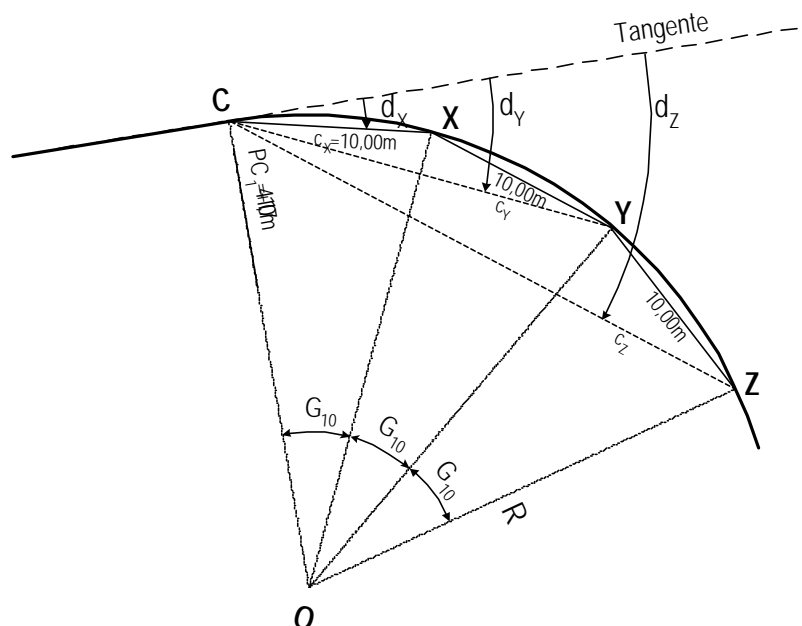
Na locação por estaca fracionária, como visto, serão locados pontos que correspondem a arcos inteiros, isto é, múltiplos do valor da corda  $c$ .

<sup>27</sup> O valor exato da deflexão  $d_m$  correspondente ao arco de 10,00m pode ser calculado por:  $d_m = 1 / (2 \cdot R)$ , em radianos.

<sup>28</sup> Pressupõe-se aqui que a locação seja procedida no sentido do estaqueamento; pode ser conveniente, em determinados casos, proceder-se à locação de uma curva circular no sentido contrário, hipótese em que a locação seria iniciada pela outra extremidade da curva, instalando-se o teodolito no PT; deve-se observar, nesses casos, a inversão do sentido de contagem dos ângulos.

EXEMPLO 4.5 : Na figura 4.8 está ilustrado, em escala deformada, o trecho inicial da curva circular projetada para a concordância do PI<sub>1</sub>, no exemplo 4.1.

FIGURA 4.8 – LOCAÇÃO POR ESTACA FRACIONÁRIA



Nessa figura, os pontos X, Y e Z compreendem cordas inteiras (no caso,  $c=10,00\text{m}$ ), representando, portanto, as seguintes estacas fracionárias:

$$X = 5 + 1,07\text{m};$$

$$Y = 5 + 11,07\text{m};$$

$$Z = 6 + 1,07\text{ m}.$$

Lembrando que a deflexão correspondente a uma corda é igual à metade do ângulo central compreendido pela corda, pode-se estabelecer, a partir da disposição da figura, as seguintes relações:

- em X (corda =  $c_X$  ; ângulo central =  $G_{10}$ ) :  $d_X = \frac{1}{2} \cdot G_{10} = d_{10}$
- em Y (corda =  $c_Y$  ; ângulo central =  $2 \cdot G_{10}$ ) :  $d_Y = \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot G_{10} = 2 \cdot d_{10} = d_X + d_{10}$
- em Z (corda =  $c_Z$  ; ângulo central =  $3 \cdot G_{10}$ ) :  $d_Z = \frac{1}{2} \cdot 3 \cdot G_{10} = 3 \cdot d_{10} = d_Y + d_{10}$

ou seja, observa-se que, para a curva circular simples, as deflexões correspondentes a arcos sucessivos são cumulativas, podendo ser obtidas por simples somas, sem necessidade de se determinar os valores das cordas  $c_Y$  e  $c_Z$ .

Calculando os valores dos ângulos de deflexão para o exemplo considerado, obtém-se:

$$d_X = 1^\circ 25' 57''$$

$$d_Y = 1^\circ 25' 57'' + 1^\circ 25' 57'' = 2^\circ 51' 54''$$

$$d_Z = 2^\circ 51' 54'' + 1^\circ 25' 57'' = 4^\circ 17' 51''$$

e assim sucessivamente.

Conhecidos os ângulos de deflexão, a materialização da curva no campo, segundo o processo de locação por deflexões acumuladas, pode então ser feita marcando-se os pontos correspondentes às estacas fracionárias com auxílio de um teodolito e de uma trena.

Instalando-se o teodolito no PC<sub>1</sub> e tomando-se a direção da tangente à curva como origem para a contagem de ângulos, posiciona-se a visada correspondente à deflexão  $d_X = 1^\circ 25' 57''$ , e marca-se o comprimento correspondente ao arco de 10,00m (substituído pela corda) ao longo do alinhamento visado, obtendo-se a posição do ponto X.

A seguir, com o teodolito estacionado no mesmo ponto, gira-se a luneta até se obter a visada correspondente à deflexão acumulada para o arco de 20,00m ( $d_Y = 2^{\circ}51'54''$ ), e mede-se o comprimento do arco de 20,00m; para tanto, basta tomar a medida de 10,00m a partir do ponto X, de modo que a extremidade da medida coincida com a linha de visada, obtendo-se a posição do ponto Y.

Ainda com o teodolito posicionado no  $PC_1$ , pode-se repetir o procedimento para a marcação das demais estacas fracionárias correspondentes às cordas de 10,00m; assim, para a materialização da próxima estaca (ponto Z), posiciona-se a visada correspondente à deflexão acumulada  $d_Z = 4^{\circ}17'51''$ , para um arco de 30,00m, e mede-se esse arco acrescentando uma medida de 10,00m a partir do ponto Y, obtendo-se a posição do ponto Z ao se interceptar a extremidade dessa medida com a linha de visada.

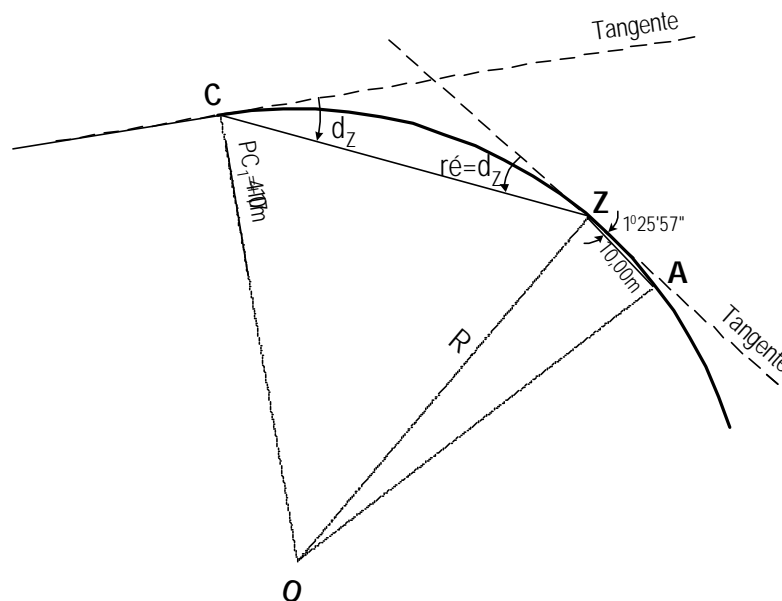
Seguindo com esse processo, poder-se ia marcar todos os pontos escolhidos da curva, até o seu final, no  $PT_1$ .

Caso exista alguma obstrução que impeça as visadas a partir do teodolito instalado no  $PC_1$ , pode-se mudar a posição do teodolito, instalando-o no último ponto locado da curva, e reiniciando o processo de locação a partir daí.

Para isso, será necessário obter a direção da tangente à curva nesse ponto, que será a nova referência (ou origem) para a contagem dos ângulos de deflexão.

A direção da tangente pode ser obtida conhecendo-se o ângulo entre a última corda ( $c_Z$ ) e a tangente cuja orientação se quer determinar, ângulo esse que é denominado de "ângulo de ré", em contraposição ao ângulo correspondente à da última deflexão visada antes da mudança de instalação do teodolito ( $d_Z$ ), e que é denominado de "ângulo de vante".

FIGURA 4.9 – MUDANÇA DE APARELHO NA LOCAÇÃO DA CURVA CIRCULAR



Na figura 4.9, onde se ilustra esquematicamente o processo de mudança do teodolito para o último ponto visado, pode-se observar que, por simetria, o ângulo de ré é sempre igual ao ângulo de vante, quando se trata de curvas circulares simples.

Instalando-se então o teodolito na nova estação (no ponto Z), visa-se a estação anterior ( $PC_1$ ) e fixa-se a visada que corresponde a um giro de  $4^{\circ}17'51''$  (ângulo de ré), obtendo-se a direção da tangente no sentido contrário ao da locação. Para se obter a orientação correta, basta agora girar a luneta em  $180^{\circ}$  ou simplesmente mergulhar a luneta, girando-a no sentido vertical.

Assim, com o teodolito instalado no ponto Z e com as novas contagens de ângulos referenciadas à tangente à curva nesse ponto, pode-se prosseguir com a marcação dos demais pontos de interesse da curva circular.

Na locação por estaca fracionária lida-se, a princípio, somente com arcos inteiros (múltiplos da corda  $c$ ). Mas ao se chegar no final de curva circular haverá necessidade de se lidar com um arco fracionário, pois o desenvolvimento da curva circular resulta quase sempre com valor fracionário.

No caso do exemplo que vem sendo utilizado para ilustrar o processo de locação, a última estaca fracionária a locar, correspondendo a arco inteiro, seria a estaca  $8 + 11,07\text{m}$ , remanesecendo um arco fracionário de  $4,51\text{ m}$  de comprimento (pois o  $PT_1$  está na estaca  $8 + 15,58\text{m}$ ).

Imaginando-se que a locação da curva pudesse ser completada com o teodolito instalado no ponto Z (estaca  $6 + 1,07\text{m}$ ), a deflexão acumulada para a locação da estaca  $8 + 11,07\text{m}$ , correspondendo a um arco de  $50,00\text{m}$ , seria igual a  $5 \cdot d_{10} = 7^\circ 09' 45''$ .

A deflexão simples correspondente ao segmento de arco de  $4,51\text{m}$  de comprimento compreendido entre essa última estaca e o  $PT_1$  pode ser calculada por (fórmula [4.7]):

$$d_{4,51\text{m}} = 4,51 \cdot d_m = 4,51 \cdot 0^\circ 08' 36'' = 0^\circ 38' 47''.$$

E a deflexão acumulada, para a locação do  $PT_1$  a partir da estaca  $6 + 1,07\text{m}$  (ponto Z), compreendendo o arco de  $54,51\text{m}$  de comprimento, seria igual a  $7^\circ 09' 45'' + 0^\circ 38' 47'' = 7^\circ 48' 32''$ .

Os elementos necessários à locação de uma curva devem ser calculados e organizados de forma apropriada para facilitar sua leitura e interpretação quando da realização dos trabalhos de locação no campo.

Para tanto, é largamente utilizada a organização tabular, na forma das denominadas *Cadernetas de Locação*.

Um modelo simples de caderneta de locação, que poderia ser empregado para o registro dos elementos necessários à locação por estaca fracionária correspondente ao exemplo acima desenvolvido, está ilustrado na tabela 4.2, contemplando a hipótese de procedimento imaginado – qual seja, a de locar os pontos X, Y e Z com o teodolito instalado no  $PC_1$ , mudando após o aparelho para o ponto Z e completando a locação com o aparelho aí estacionado.

Foram incluídos, nessa tabela, os valores dos ângulos de ré necessários ao posicionamento das tangentes à curva nos pontos de mudança do teodolito, quando da instalação do aparelho.

As estações para instalação do teodolito estão assinaladas, na tabela, pelo símbolo  $\otimes$ , estando também discriminados os correspondentes valores dos azimutes das tangentes à curva nesses pontos.

O valor do azimute da tangente à curva em uma estação pode ser calculado somando-se ao azimute da tangente na estação anterior os valores do ângulo de vante e do ângulo de ré.

Esses ângulos foram somados porque se trata de uma curva à direita, com mudanças de direção acontecendo no sentido horário, o mesmo da contagem dos azimutes; caso se tratasse de uma curva à esquerda, o azimute da tangente à curva em uma estação seria obtido subtraindo -se do valor do azimute da tangente à curva na estação anterior os valores dos ângulos de vante e de ré.

TABELA 4.2 – LOCAÇÃO DA CURVA CIRCULAR POR ESTACA FRACIONÁRIA

ESTACAS	ARCOS (m)	DEFLEXÕES		AZIMUTES	OBSERVAÇÕES
		SIMPLES	ACUMULADAS		
$\otimes PC_1 = 4 + 11,07\text{m}$	-	-	-	$55^\circ 00' 00''$	Tangente 0- $PC_1$
5 + 1,07m	10,00	$1^\circ 25' 57''$	$1^\circ 25' 57''$		
5 + 11,07m	10,00	$1^\circ 25' 57''$	$2^\circ 51' 54''$		
$\otimes Z = 6 + 1,07\text{m}$	10,00	$1^\circ 25' 57''$	$4^\circ 17' 51''$	$63^\circ 35' 42''$	Ré = $4^\circ 17' 51''$
6 + 11,07m	10,00	$1^\circ 25' 57''$	$1^\circ 25' 57''$		
7 + 1,07m	10,00	$1^\circ 25' 57''$	$2^\circ 51' 54''$		
7 + 11,07m	10,00	$1^\circ 25' 57''$	$4^\circ 17' 51''$		
8 + 1,07m	10,00	$1^\circ 25' 57''$	$5^\circ 43' 48''$		
8 + 11,07m	10,00	$1^\circ 25' 57''$	$7^\circ 09' 45''$		
$\otimes PT_1 = 8 + 15,58\text{m}$	4,51	$0^\circ 38' 47''$	$7^\circ 48' 32''$	$79^\circ 12' 46''$	Ré = $7^\circ 48' 32''$

A tangente à curva no  $PT_1$  é o próprio alinhamento  $PI_1 - PI_2$ . Observando-se o valor do azimute calculado para a tangente, conforme consta na tabela 4.2, verifica-se que este não coincide rigorosamente com o valor correto do Azimute do alinhamento  $PI_1 - PI_2$ , que pode ser calculado diretamente somando-se ao Azimute do alinhamento anterior, o valor da deflexão  $I_1$ , de acordo com as fórmulas vistas no item 3.3.1 (qual a diferença encontrada e por que ela se verifica?).

#### 4.3.3.2 Locação por estaca inteira

Na locação por estaca inteira objetiva-se a marcação dos pontos que correspondem às estacas inteiras e múltiplas do valor da corda máxima permitida para a locação da curva circular.

Isto resultará, em relação ao procedimento do caso anterior, apenas na necessidade adicional de se lidar com um arco fracionário já na locação do primeiro ponto da curva, pois numa concordância horizontal com curva circular simples, com os raios de curva normalmente utilizados, o PC (bem assim o PT) geralmente resulta em estaca fracionária.

Os demais pontos intermediários da curva envolvem arcos de comprimentos inteiros (múltiplos da corda  $c$ ), demandando cálculos com deflexões múltiplas de  $d_c$ .

No final da curva, a exemplo do caso anterior, novamente se lidará com um último arco fracionário, dado que o PT também se posiciona, em geral, em estaca fracionária.

Mas o procedimento para o cálculo é o mesmo que o do caso da locação por estaca fracionária, posto que a propriedade cumulativa das deflexões independe dos valores dos arcos (e das cordas) envolvidos.

**EXEMPLO 4.6** : Utilizando-se da mesma concordância horizontal que serviu para exemplificar o tipo de locação anterior, podem ser calculados os elementos para a locação da curva circular por estaca inteira, chegando-se aos resultados que constam na tabela 4.3 (verifique ao menos alguns dos ângulos!).

Neste exemplo, com o objetivo de enfatizar os procedimentos de cálculo pertinentes, foram introduzidas diversas mudanças de aparelho.

TABELA 4.3 – LOCAÇÃO DA CURVA CIRCULAR POR ESTACA INTEIRA

ESTACAS	ARCOS (m)	DEFLEXÕES		AZIMUTES	OBSERVAÇÕES
		SIMPLES	ACUMULADAS		
⊗ $PC_1 = 4 + 11,07m$	-	-	-	$55^{\circ}00'00''$	Tangente 0- $PC_1$
5 + 0,00m	8,93	$1^{\circ}16'48''$	$1^{\circ}16'48''$		
5 + 10,00m	10,00	$1^{\circ}25'57''$	$2^{\circ}42'45''$		
⊗ 6 + 0,00m	10,00	$1^{\circ}25'57''$	$4^{\circ}08'42''$	$63^{\circ}17'24''$	Ré = $4^{\circ}08'42''$
6 + 10,00m	10,00	$1^{\circ}25'57''$	$1^{\circ}25'57''$		
⊗ 7 + 0,00m	10,00	$1^{\circ}25'57''$	$2^{\circ}51'54''$	$69^{\circ}01'12''$	Ré = $2^{\circ}51'54''$
7 + 10,00m	10,00	$1^{\circ}25'57''$	$1^{\circ}25'57''$		
⊗ 8 + 0,00m	10,00	$1^{\circ}25'57''$	$2^{\circ}51'54''$	$74^{\circ}45'00''$	Ré = $2^{\circ}51'54''$
8 + 10,00m	10,00	$1^{\circ}25'57''$	$1^{\circ}25'57''$		
⊗ $PT_1 = 8 + 15,58m$	5,58	$0^{\circ}47'59''$	$2^{\circ}13'56''$	$79^{\circ}12'52''$	Ré = $2^{\circ}13'56''$

Também neste exemplo, pode-se verificar diferenças entre o valor do azimute calculado para a última tangente (que corresponde ao alinhamento  $PI_1 - PI_2$ ) e o valor correto do azimute desse alinhamento (por que a diferença aumentou em relação ao caso da locação por estaca fracionária?).

#### 4.3.4 Raios de curva tabelados

Nas concordâncias horizontais propostas no exemplo 4.1 foram utilizados raios de curva inteiros ( $R_1 = 200,00\text{m}$  e  $R_2 = 250,00\text{m}$ ).

O fato de se lidar com valores inteiros de raios de curva não resultou em vantagens palpáveis, exceto as relacionadas com a facilidade de notação ou de digitação dos valores para fins de cálculos das concordâncias.

No entanto, quando se procedeu aos cálculos para fins de locação de curvas, pôde-se observar que os valores referentes às deflexões resultaram fracionários, demandando arredondamentos, mesmo quando expressos em segundos.

Isso não representa dificuldades teóricas maiores, se os cálculos forem executados com critério adequado e observando os devidos cuidados, mas a definição de valores fracionários de deflexões, com os equipamentos convencionais, dificulta um pouco o posicionamento das visadas no campo.

Esse tipo de dificuldade pode ser facilmente superado quando se utilizam, para fins de concordâncias horizontais, raios de curvas circulares escolhidos de forma a que as deflexões de interesse resultem inteiras ou, pelo menos, múltiplas de valores que possam ser facilmente marcados nas visadas dos teodolitos empregados para as locações.

No exemplo visto, utilizando-se o raio  $R_1 = 200,00\text{m}$  chegou-se aos valores de deflexão  $d_{10} = 1^\circ 25' 57''$  (para a corda de  $10,00\text{m}$ ) e  $d_m = 0^\circ 08' 36''$  (para a corda de  $1,00\text{m}$  – a deflexão por metro), valores fracionários que resultaram nas dificuldades comentadas.

Isto não teria acontecido caso a deflexão por metro  $d_m$  fosse, por exemplo, exatamente igual a 8 minutos.

Nesse caso, a deflexão para uma corda de  $10,00\text{m}$  resultaria:  $d_{10} = 10 \cdot d_m = 10 \cdot 8' = 1^\circ 20' 00''$ , valor de ângulo de deflexão inteiro, passível de fácil definição nos teodolitos convencionais (como saber se a corda a considerar deve ser de  $5,00\text{m}$ ,  $10,00\text{m}$  ou  $20,00\text{m}$ ?).

Para que estas propriedades interessantes fossem viabilizadas, bastaria definir o raio de curva circular adequado, ao qual correspondessem as deflexões desejadas.

Combinando as fórmulas [4.4] e [4.5], pode-se chegar à definição da seguinte expressão, que explicita o valor do raio de curva circular ( $R$ ) em função da corda ( $c$ ) e da deflexão para essa corda ( $d_c$ ):

$$R = \frac{c}{2 \cdot \text{sen}(d_c)} \quad [4.8]$$

**EXEMPLO 4.7 :** Utilizando a fórmula [4.8] pode-se calcular o valor do raio ao qual correspondem as deflexões inteiras que interessam ( $d_m = 8'$  e  $d_{10} = 1^\circ 20' 00''$ ), que resulta, com o devido arredondamento:

$$R = \frac{10,00}{2 \cdot \text{sen}(1^\circ 20' 00'')} = 214,88\text{m}.$$

Outra vantagem de se utilizar raios de curva que, embora fracionários, resultem em deflexões inteiras, é o fato de se poder trabalhar com um número limitado de raios de curva, facilitando a construção de tabelas para fins de cálculo de concordâncias. Isto é particularmente interessante quando os cálculos são feitos manualmente, principalmente nos casos de concordâncias com curvas de transição, conforme se verá adiante.

Na tabela 4.4 a seguir estão apresentados alguns raios de curva (fracionários) aos quais correspondem deflexões "inteiras".

O leitor é convidado a verificar os cálculos e a definir outros valores intermediários que possam interessar para fins de projeto.

TABELA 4.4 – RAIOS DE CURVA TABELADOS

R < 100,00 m c = 5,00 m			100,00 m < R < 600,00 m c = 10,00 m			R > 600,00 m c = 20,00 m		
R (m)	d <sub>5</sub> = G <sub>5</sub> /2	d <sub>m</sub>	R (m)	d <sub>10</sub> = G <sub>10</sub> /2	d <sub>m</sub>	R (m)	d <sub>20</sub> = G <sub>20</sub> /2	d <sub>m</sub>
31,86	4°30'00"	54'	107,47	2°40'00"	16'	644,60	0°53'20"	2'40"
34,41	4°10'00"	50'	122,81	2°20'00"	14'	736,68	0°46'40"	2'20"
39,09	3°40'00"	44'	143,27	2°00'00"	12'	859,46	0°40'00"	2'
45,26	3°10'00"	38'	171,91	1°40'00"	10'	1.031,34	0°33'20"	1'40"
50,58	2°50'00"	34'	214,88	1°20'00"	8'	1.289,17	0°26'40"	1'20"
61,41	2°20'00"	28'	286,49	1°00'00"	6'	1.718,88	0°20'00"	1'
71,63	2°00'00"	24'	343,79	0°50'00"	5'	2.578,32	1°13'20"	0'40"
85,96	1°40'00"	20'	429,73	0°40'00"	4'	3.437,75	0°10'00"	0'30"
95,50	1°30'00"	18'	572,97	0°30'00"	3'	5.156,62	0°06'40"	0'20"

Caso a concordância projetada para o PI<sub>1</sub>, no exemplo 4.1 fosse projetada com o raio R = 214,88 m, o cálculo da caderneta de locação por estaca fracionária e o próprio processo de locação da curva no campo ficariam bastante facilitados, pois envolveriam (exceto na última deflexão) apenas valores de ângulos inteiros, podendo as contas serem feitas "de cabeça".

**EXEMPLO 4.8** : Projetando nova concordância horizontal para o PI<sub>1</sub>, com curva circular simples de raio R = 214,88 m, chega-se à determinação de outras posições para os pontos singulares, quais sejam: PC<sub>1</sub> = 4 + 7,88 m e PT<sub>1</sub> = 8 + 18,68 m (por que se modificaram as posições dos pontos singulares? verifique o cálculo dessas estacas!). Pode-se, então, calcular os ângulos de deflexão para a locação por estaca fracionária e organizar os resultados na forma da caderneta de locação ilustrada na tabela 4.5, onde foram consideradas 2 mudanças intermediárias do aparelho, na locação (verifique ao menos o cálculo de alguns desses ângulos!).

TABELA 4.5 – LOCAÇÃO POR ESTACA FRACIONÁRIA : RAIOS TABELADO

ESTACAS	ARCOS (m)	DEFLEXÕES		AZIMUTES	OBSERVAÇÕES
		SIMPLES	ACUMULADAS		
⊗ PC <sub>1</sub> = 4 + 7,88m	-	-	-	55°00'00"	Tangente 0-PC <sub>1</sub>
4 + 17,88m	10,00	1°20'00"	1°20'00"		
5 + 7,88m	10,00	1°20'00"	2°40'00"		
5 + 17,88m	10,00	1°20'00"	4°00'00"		
⊗ 6 + 7,88m	10,00	1°20'00"	5°20'00"	65°40'00"	Ré = 5°20'00"
6 + 17,88m	10,00	1°20'00"	1°20'00"		
⊗ 7 + 7,88m	10,00	1°20'00"	2°40'00"	71°00'00"	Ré = 2°40'00"
7 + 17,88m	10,00	1°20'00"	1°20'00"		
8 + 7,88m	10,00	1°20'00"	2°40'00"		
8 + 17,88m	10,00	1°20'00"	4°00'00"		
⊗ PT <sub>1</sub> = 8 + 18,68m	0,80	0°06'24"	4°06'24"	79°12'48"	Ré = 4°06'24"

Observe-se que todos os ângulos de deflexão, neste caso, poderão ser calculados, sem preocupações quanto à perda de precisão, pela fórmula [4.7], pois o valor da deflexão por metro (d<sub>m</sub>) para o raio utilizado foi determinado sem necessidade de arredondamentos.



Assim, por exemplo, o valor da deflexão acumulada para a última deflexão constante na tabela 4.5, que compreende um arco de 30,80m, poderia ter sido calculado diretamente por:

$$d_{30,80m} = 30,80 \cdot d_m = 30,80 \cdot 8' = 4^{\circ}06'24''.$$

A maior facilidade de locação das curvas devido à utilização de raios tabelados, que resultam em deflexões inteiras, não acontece quando se procede à locação por estaca inteira, pois neste caso, já o primeiro ângulo de deflexão resulta fracionário, devido ao valor fracionário do arco envolvido<sup>29</sup>.

Não obstante, as vantagens oferecidas para os cálculos de deflexões permanecem, daí o interesse pelo uso de raios com valores fracionários, mas com deflexões "inteiras".

---

<sup>29</sup> A facilidade de locação volta a acontecer após uma mudança do teodolito para um ponto correspondente a uma estaca inteira ou múltipla do valor da corda.







# 5

## SUPERELEVAÇÃO E SUPERLARGURA

### 5.1 COMENTÁRIOS

Ao se definir a velocidade diretriz para o projeto geométrico de uma rodovia, procura-se estabelecer, ao longo do traçado em projeto, condições tais que permitam aos usuários o desenvolvimento e a manutenção de velocidades de percurso próximas à velocidade de referência, em condições de conforto e segurança (reveja o conceito de velocidade diretriz).

No projeto em planta, o eixo é constituído por trechos em tangente e em curva, que apresentam condições de operação naturalmente diferentes.

Quando percorre um trecho em tangente (desconsiderando-se por ora as condições em perfil), um usuário experimenta uma certa sensação de liberdade (ou facilidade) para efetuar pequenas manobras de ajuste lateral no seu curso, não estando sujeito, em princípio, a esforços laterais<sup>30</sup> devidos à geometria da rodovia.

Ao percorrer um trecho em curva, no entanto, as condições operacionais se alteram, devido principalmente ao surgimento de esforços laterais, que passam a atuar sobre o veículo, e devido à sensação de maior confinamento que um trecho em curva impõe ao usuário que a percorre. Estes fatores podem afetar, em seu conjunto, a disposição do usuário em manter a mesma velocidade de operação nos trechos em tangente e nos trechos em curva.

Visando minimizar a impactação negativa desses fatores inerentes aos trechos curvos, são introduzidos os conceitos de superelevação e de superlargura que, devidamente considerados nos projetos das curvas horizontais, ensejam condições de operação mais homogêneas para os usuários ao longo das rodovias.

### 5.2 SUPERELEVAÇÃO

Ao percorrer um trecho de rodovia em curva horizontal com certa velocidade, um veículo fica sujeito à ação de uma força centrífuga, que atua no sentido de dentro para fora da curva, tendendo a mantê-lo em trajetória retilínea, tangente à curva.

Isto obriga o condutor do veículo a esterçar o volante no sentido da curva para manter o veículo na trajetória desejada.

Imaginando-se uma pista de rolamento plana (sem abaulamentos ou inclinações transversais), essa manobra do condutor é capaz de manter o veículo na pista, na trajetória curva, graças ao atrito que se desenvolve entre os pneus e a superfície de rolamento (o que aconteceria se não houvesse esse atrito?).

---

<sup>30</sup> Não se considera restrição significativa o esforço lateral devido ao abaulamento, por ser contínuo e quase imperceptível ao usuário, para os valores convencionais de declividade transversal recomendados.

Mas os efeitos combinados da força de atrito e da força centrífuga<sup>31</sup> se fazem sentir tanto sobre os passageiros dos veículos quanto sobre as cargas transportadas. O efeito principal sobre os passageiros é a sensação de desconforto causada pelos esforços laterais que empurram os passageiros para um lado ou para outro, dependendo do sentido da curva. Sobre as cargas, a atuação das forças laterais pode causar danos a mercadorias frágeis e desarrumação dos carregamentos, podendo até mesmo comprometer a estabilidade dos veículos em movimento.

Para contrabalançar os efeitos dessas forças laterais, procurando oferecer aos usuários melhores condições de conforto e de segurança no percurso das curvas horizontais, é utilizado o conceito de *superelevação* da pista de rolamento, que é a declividade transversal da pista nos trechos em curva, introduzida com a finalidade de reduzir ou eliminar os efeitos das forças laterais sobre os passageiros e sobre as cargas dos veículos em movimento.

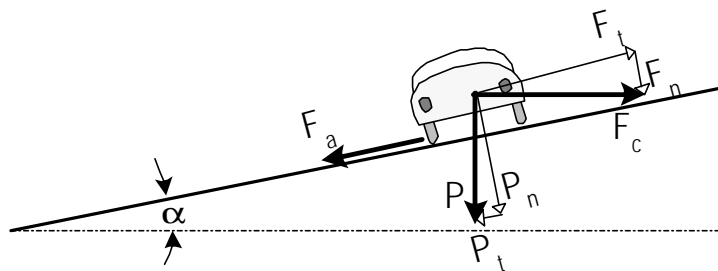
A superelevação é medida pela inclinação transversal da pista em relação ao plano horizontal, sendo expressa em proporção (m/m) ou em percentagem (%).

Na figura 5.1 representa-se o diagrama de forças que atua sobre um veículo em movimento, descrevendo uma trajetória circular, com uma dada velocidade longitudinal (tangencial), numa pista inclinada transversalmente. Na figura, a pista está inclinada com um ângulo  $\alpha$ , podendo a superelevação ( $e$ ) ser expressa por:

$$e = \text{tg}(\alpha) \quad (\text{adimensional ou m/m}), \text{ ou}$$

$$e = 100 \cdot \text{tg}(\alpha) \quad (\%).$$

FIGURA 5.1 – FORÇAS ATUANTES SOBRE UM VEÍCULO EM TRAJETÓRIA CURVA



Na figura 5.1 estão representadas, numa seção transversal, as três principais forças que atuam sobre o veículo em movimento, quais sejam:

- a força de atrito ( $F_a$ ), que atua sobre as faces dos pneus em contato com a pista;
- a força centrífuga ( $F_c$ ), que é horizontal e atua sobre o centro de gravidade do veículo, podendo ser decomposta segundo as componentes:
  - tangencial à pista, dada por :  $F_t = F_c \cdot \cos(\alpha)$ ; e
  - normal à pista, dada por :  $F_n = F_c \cdot \sin(\alpha)$ ;
- a força peso do veículo ( $P$ ), que é vertical e atua sobre o centro de gravidade de veículo, e que pode ser decomposta segundo as componentes:
  - tangencial à pista, dada por :  $P_t = P \cdot \sin(\alpha)$ ; e
  - normal à pista, dada por :  $P_n = P \cdot \cos(\alpha)$ .

<sup>31</sup> Observe-se que, na verdade, é a ação da força de atrito que se faz sentir sobre os passageiros e sobre as cargas dos veículos numa trajetória curva. Caso não houvesse o atrito, os veículos simplesmente não responderiam às mudanças de direção das rodas dianteiras e permaneceriam em trajetória retilínea (como na superfície de um lago congelado); a força de atrito é que atua sobre os veículos (e portanto sobre os respectivos passageiros e cargas), puxando-os para dentro da curva e mantendo-os na trajetória curva ao equilibrar a ação da força centrífuga.

A equação de equilíbrio de forças, no plano paralelo ao da pista de rolamento, pode ser representada por:

$$F_t = F_a + P_t$$

ou seja, o efeito da força centrífuga é compensado pelo da força de atrito somado ao da componente tangencial do peso do veículo (este último é que se constitui no efeito principal resultante da introdução da superelevação!).

Observe-se que, para uma dada velocidade de percurso e para um mesmo raio de curvatura, quanto maior for a superelevação menor será a participação da força de atrito no equilíbrio das forças laterais, diminuindo portanto a intensidade da resultante das forças laterais que atuam sobre os passageiros e sobre as cargas.

A força centrífuga que atua sobre o veículo, nas condições representadas na figura 5.1, pode ser calculada por:

$$F_c = \frac{m \cdot v^2}{R}$$

onde:

- $F_c$  = força centrífuga (N);
- $m$  = massa do veículo (kg);
- $v$  = velocidade tangencial do veículo (m/s);
- $R$  = raio da curva circular (m).

Lembrando que  $F_t = F_c \cdot \cos(\alpha)$ , e que:

$$m = \frac{P}{g}$$

onde  $g$  é a aceleração normal da gravidade ( $9,8 \text{ m/s}^2$ ), a componente tangencial da força centrífuga pode ser expressa por:

$$F_t = \frac{P \cdot v^2}{g \cdot R} \cdot \cos(\alpha)$$

A força de atrito pode ser calculada, considerando a metodologia convencional da física (mecânica) clássica, por:

$$F_a = f \cdot (P_n + F_n)$$

onde:

- $F_a$  : força de atrito (N);
- $f$  : coeficiente de atrito entre o pneu e o pavimento (adimensional);
- $(P_n + F_n)$  : força de contato entre o pneu e o pavimento, perpendicular à superfície de contato (N).

Nessa expressão, dado que  $F_n$  resultará muito pequeno perante  $P_n$  para as inclinações transversais  $\alpha$  normalmente empregadas (verifique isso, com valores usuais em projetos de rodovias!), despreza-se, para fins práticos, a força  $F_n$ , e se considera que:

$$F_a \cong f \cdot P_n = f \cdot P \cdot \cos(\alpha)$$

Substituindo as expressões já vistas na equação de equilíbrio das forças que atuam lateralmente sobre o veículo, na seção transversal, tem-se, no plano paralelo ao da pista:

$$\frac{P \cdot v^2}{g \cdot R} \cdot \cos(\alpha) = f \cdot P \cdot \cos(\alpha) + P \cdot \sin(\alpha) \quad [5.1]$$

Dividindo todas as parcelas por  $P \cdot \cos(\alpha)$  e convertendo as unidades para expressar a variável velocidade em km/h, chega-se a:

$$\frac{\left(\frac{V}{3,6}\right)^2}{9,8 \cdot R} = f + \operatorname{tg}(\alpha)$$

ou, já representando o valor de  $\operatorname{tg}(\alpha)$  pela notação de superelevação ( $e$ ),

$$e = \frac{V^2}{127 \cdot R} - f \quad [5.2]$$

equação que é conhecida como *fórmula da superelevação teórica*, onde:

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

O coeficiente de atrito  $f$  difere do conceito puro de coeficiente de atrito da física clássica, pois se trata de um coeficiente de atrito de deslizamento lateral, medido dinamicamente, isto é, com o veículo em movimento.

Em razão disso, o valor desse coeficiente de atrito transversal é variável, diminuindo à medida que aumenta a velocidade tangencial do veículo.

Os valores a adotar para o coeficiente de atrito  $f$  são fixados pelas normas de projeto geométrico, tendo sido obtidos a partir de resultados de medições de campo realizadas em pesquisas bastante antigas, nas décadas de 30 a 50, e confirmadas por trabalhos mais recentes, de 1985, nos Estados Unidos (AASHTO, 1995, p.146; 154).

As normas do DNER fixam, como valores de coeficientes de atrito transversal máximos admissíveis para fins de projeto, os transcritos na tabela 5.1 para diferentes velocidades diretrizes.

TABELA 5.1 – VALORES MÁXIMOS ADMISSÍVEIS DO COEFICIENTE  $f$

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

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

Esses valores são bastante inferiores aos limites verificados<sup>32</sup> para determinadas condições de pneus e de pavimentos, e correspondem, na verdade, a coeficientes de atrito que foram medidos experimentalmente, com equipamentos apropriados, em velocidades tais que os motoristas, no limiar da sensação de desconforto, reagem instintivamente, evitando transitar em velocidades maiores.

Os valores máximos admissíveis do coeficiente de atrito transversal somente são empregados, em princípio, nas condições limites, ou seja, para as concordâncias horizontais com curvas de raios mínimos e com as superelevações máximas admitidas para o projeto.

A fórmula 5.1 não deve ser utilizada diretamente, na determinação da superelevação a ser adotada para o projeto de uma concordância horizontal, com os valores da tabela 5.1.

Para ilustrar esta afirmação, o leitor é convidado a determinar, com o auxílio da fórmula 5.1 e dos valores da tabela 5.1, a superelevação a ser adotada no projeto de uma concordância horizontal com raio de curva circular  $R = 35,00$  m, considerando uma velocidade tangencial  $V = 70$  km/h (a curva horizontal poderia ser construída com a superelevação encontrada? o que estaria errado?).

<sup>32</sup> A experiência Norte-Americana aponta que valores máximos do coeficiente  $f$  obtidos para condição de pneus novos em pavimento de concreto molhado variaram de  $f=0,5$  para  $V=30$  km/h a  $f=0,35$  para  $V=100$  km/h (AASHTO, 1995, p. 143).



### 5.2.1 Valores mínimos e máximos de superelevação

No projeto e construção de uma rodovia, os trechos em tangente têm pista dotada de abaulamento, para facilitar a condução das águas pluviais para fora da superfície de rolamento.

O acúmulo de água na pista poderia causar riscos aos usuários (eventualmente até a aquaplanagem de veículos transitando com excesso de velocidade), além de favorecer a infiltração de águas superficiais para as camadas inferiores do pavimento e para o subleito.

As Normas do DNER consideram adequada a utilização dos seguintes valores para o abaulamento, nos projetos de rodovias com os pavimentos convencionais, (DNER, 1999, p. 146):

- revestimentos betuminosos com granulometria aberta: 2,500% a 3,000%;
- revestimentos betuminosos de alta qualidade (CAUQ): 2,000%;
- pavimento de concreto de cimento: 1,500%.

Nos trechos em curva, a retirada das águas superficiais da pista é possibilitada pela existência de superelevações.

Para curvas com raios muito grandes em relação à velocidade diretriz de projeto, os efeitos da força centrífuga resultariam desprezíveis, podendo-se projetar as seções transversais da pista nessas curvas para as condições de trecho em tangente, isto é, com abaulamentos, dispensando-se o uso de superelevações.

Os valores de raios de curva acima dos quais as Normas do DNER sugerem considerar as curvas como se fossem tangentes, no dimensionamento das seções transversais, estão indicados na tabela 5.2.

TABELA 5.2 – VALORES DE R QUE DISPENSAM SUPERELEVAÇÃO

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

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

Curvas com raios abaixo dos valores apontados na tabela 5.2 exigem a consideração de superelevação adequada.

A superelevação mínima admissível, nesses casos, mesmo quando as forças centrífugas envolvidas não a demandem, deverá ter valor igual ao do abaulamento, para fins de assegurar a devida drenagem superficial.

Já o valor máximo admissível de superelevação a adotar para as concordâncias horizontais com raios pequenos, é estabelecido em função de outros critérios de ordem prática, levando-se em consideração aspectos técnicos e econômicos.

A maior taxa de superelevação admitida para fins de projeto de rodovias no Brasil é de 12%, devendo seu emprego ser limitado a casos de melhorias de rodovias existentes ou de correção de problemas existentes que não permitam o aumento dos raios de curvatura; superelevações dessa ordem são muito problemáticas para veículos lentos, que transitam com velocidades significativamente inferiores à velocidade diretriz, pois nesses casos a manutenção dos veículos nas trajetórias curvas pode demandar o esterçamento do volante no sentido contrário ao da curva, causando operação errática e perigosa.

A superelevação máxima de 10% tem aplicação limitada ao projeto de rodovias de elevado padrão, onde as velocidades de operação dos veículos são relativamente elevadas, com pequena probabilidade de congestionamentos ou de ocorrência de situações que determinem o tráfego a baixas velocidades ou mesmo a parada de veículos sobre a pista. As Normas do DNER permitem a consideração desse valor de superelevação máxima para os projetos na Classes 0 e na Classe I (vide

tabela 2.3), mas recomendam limitar o seu emprego, nos casos de projetos de rodovias em Classe I, para as regiões de relevo plano e ondulado, que compreendem velocidades diretrizes não inferiores a 80 km/h (DNER, 1999, p. 98).

Para as demais classes de projeto de rodovias, as Normas do DNER preconizam a adoção da superelevação máxima de 8%; esse valor pode ser também adotado para o projeto de rodovias de padrões mais elevados quando as condições previsíveis sugiram possibilidade de operação com velocidades médias significativamente mais baixas que as desejáveis.

A consideração de superelevação máxima de 6% é recomendável para os projetos de rodovias que se desenvolvam em áreas onde as características de ocupação das áreas adjacentes dificultem o projeto de pistas superelevadas ou mesmo interfiram com as condições de fluidez do tráfego nas rodovias, resultando em velocidades de operação reduzidas.

Quando as características de ocupação das áreas adjacentes são ainda mais problemáticas, pode-se admitir o desenvolvimento de projetos com superelevação máxima limitada a 4% nas curvas horizontais. Por razões de segurança, a AASHTO recomenda que este valor de superelevação máxima seja considerado somente em áreas urbanas (AASHTO, 1995, p. 158).

Uma vez definido o valor da superelevação máxima para o projeto de uma rodovia, este limite deverá ser observado em todo o projeto, servindo como parâmetro de referência na determinação dos valores específicos de superelevação a adotar para os diferentes raios de curvas, nas concordâncias horizontais.

## 5.2.2 Raios mínimos das concordâncias horizontais

Uma vez estabelecida a superelevação máxima a ser observada nas concordâncias horizontais para determinada condição ou classe de projeto de uma rodovia, fica também definido o menor raio de curva que pode ser utilizado, de forma a não haver necessidade de empregar superelevações maiores que a máxima fixada.

A fórmula 5.1, devidamente convertida, é utilizada pelas normas na determinação dos raios mínimos de curva admissíveis nos projetos. Explicitando, na citada fórmula, o raio (R), tem-se que:

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

e, na condição limite:

$$R_{\min} = \frac{V^2}{127 \cdot (e_{\max} + f_{\max})} \quad [5.3]$$

Considerando os valores máximos admissíveis de coeficientes de atrito transversal discriminados na tabela 5.1, pode-se calcular, por intermédio da fórmula [5.3], os valores dos raios mínimos de curva que podem ser utilizados nos projetos, referenciados aos diferentes valores de superelevação máxima a adotar.

Na tabela 5.3 estão relacionados tais valores de raios mínimos, sugerindo-se ao leitor a comparação entre esses valores e os constantes da tabela 2.3 (convida-se o leitor a determinar o valor do raio mínimo de curva horizontal que pode ser admitido para o projeto de uma rodovia nova na Classe II do DNER, em região de relevo ondulado, e a comparar o valor do raio mínimo encontrado com o do raio de curva utilizado no problema sugerido no final do item 5.2).

TABELA 5.3 – RAIOS MÍNIMOS DE CURVA PARA PROJETOS (metros)

Superelevação máxima ( $e_{\max}$ )	VELOCIDADE DIRETRIZ (km/h)									
	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
4 %	30	60	100	150	205	280	355	465	595	755
6 %	25	55	90	135	185	250	320	415	530	665
8 %	25	50	80	125	170	230	290	375	475	595
10 %	25	45	75	115	155	210	265	345	435	540
12 %	20	45	70	105	145	195	245	315	400	490

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

### 5.2.3 Superelevações a adotar nas concordâncias

A superelevação máxima estabelecida para o projeto de uma rodovia somente deve ser utilizada nas concordâncias projetadas com o raio mínimo, que é uma condição extrema do projeto, a ser evitada sempre que possível e razoável.

Quando se empregam raios de curva maiores que o mínimo, as forças centrífugas envolvidas diminuem à medida que aumenta o raio de curva, reduzindo, conseqüentemente, os valores de forças de atrito e/ou os de forças devidas à superelevação necessários para equilibrar as forças centrífugas.

Esta condição está matematicamente implícita da fórmula [5.2] que pode ser convenientemente transformada, resultando na igualdade:

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

Dado um raio de curva maior que o mínimo, há diferentes formas e critérios de balancear os valores de superelevação ( $e$ ) e de coeficiente de atrito ( $f$ ), de modo a que a soma de seus efeitos se iguale à força centrífuga atuante sobre o veículo.

O critério desenvolvido pela AASHTO para tal balanceamento é o de estabelecer uma relação variável entre as participações de ( $e$ ) e de ( $f$ ) à medida que variam os raios de curva ( $R$ ).

O método adotado tem como pressupostos básicos:

- a velocidade média real de operação dos veículos ( $V_R$ ) é menor que a velocidade diretriz ( $V$ ); os valores de velocidades considerados estão relacionados na tabela 5.4 a seguir, onde estão também registrados os correspondentes valores de coeficiente de atrito máximo admissível ( $f_{\max}$ ) pela AASHTO<sup>33</sup>:

TABELA 5.4 – VELOC. MÉDIAS DE OPERAÇÃO ( $V_R$ ) e COEFICIENTES ( $f_{\max}$ )

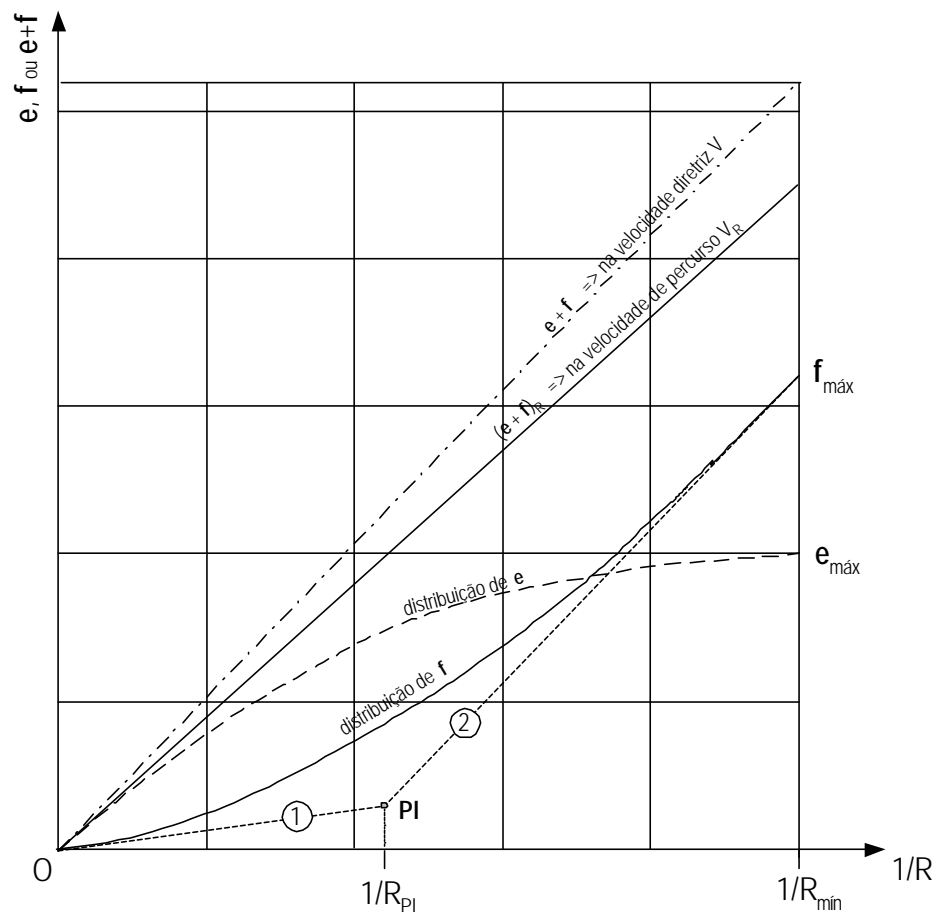
V (km/h)	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
$V_R$ (km/h)	30	40	47	55	63	70	77	85	91	98
$f_{\max}$ (m/m)	0,17	0,17	0,16	0,15	0,14	0,14	0,13	0,12	0,11	0,09

Fonte: AASHTO (1995, p. 156; 172)

<sup>33</sup> A AASHTO adota valores mais conservadores em relação aos admitidos pelo DNER (compare esses valores com os da tabela 5.1).

- para raio infinito, ou curvatura nula ( $1/R = 0$ ), como não há força de atrito, o efeito combinado da superelevação e do atrito é nulo ( $e + f = 0$ ); para raio de curva mínimo (ou curvatura  $1/R_{\min}$ ), esse efeito combinado tem valor máximo, dado por ( $e_{\max} + f_{\max}$ ), calculado para a velocidade diretriz; para valores intermediários de curvatura ( $1/R$ ), o valor de  $(e + f)_R$  é obtido por interpolação linear (por que linear?);
- para fins de referência, considera-se que à medida em que diminui o raio de curva ( $R$ ) os efeitos da força centrífuga (calculados para a velocidade  $V_R$ ) são contrabalançados somente com a superelevação ( $e$ ), sem contar com o atrito ( $f$ ), até se atingir a superelevação máxima admissível fixada ( $e_{\max}$ ), que se verificará para um certo raio de curva ( $R_{PI}$ );
- admitindo-se, no entanto, que os veículos trafeguem na velocidade diretriz ( $V$ ) e não na velocidade ( $V_R$ ), a manutenção da condição acima implica em se considerar que, até o raio  $R_{PI}$ , o atrito ( $f$ ) não é nulo, participando com uma parcela crescente, correspondente ao diferencial de velocidades ( $V - V_R$ ), que se soma à superelevação; na figura 5.2, onde se ilustra o critério descrito, a reta 1 indica a participação do coeficiente de atrito no estágio inicial, em que se contava, por hipótese, apenas com a superelevação (na velocidade  $V_R$ );

FIGURA 5.2 – MÉTODO DE BALANCEAMENTO DA SUPERELEVAÇÃO E DO ATRITO



Fonte: AASHTO (1990, p. 157)

- para valores de raio menores que  $R_{PI}$ , contando com a superelevação máxima ( $e_{m\acute{a}x}$ ), passa-se a contar com a participação crescente do atrito ( $f$ ), calculado para a velocidade diretriz ( $V$ ), até chegar ao limite ( $f_{m\acute{a}x}$ ), para o raio de curva mínimo admitido ( $R_{m\acute{i}n}$ ); a participação do atrito ( $f$ ) nesse estágio está ilustrada pela reta 2, na figura 5.2;
- os valores de coeficiente de atrito ( $f_R$ ) a considerar no projeto, para cada curvatura ( $1/R$ ) são então definidos pela curva (parábola do 2º grau) delimitada pelas retas 1 e 2 da figura 5.2, tangente às suas extremidades;
- definidos os valores de coeficiente de atrito a adotar, os valores de superelevação ( $e_R$ ) são então determinados, para cada raio de curva ( $R$ ), por:

$$e_R = (e + f)_R - f_R$$

O DNER descreve critério assemelhado, porém mais simplificado, para a determinação dos valores de superelevação a adotar para cada concordância horizontal no projeto de rodovias.

Considerando apenas a velocidade diretriz, foram adotadas basicamente as mesmas hipóteses de referência para contrabalançar o efeito da força centrífuga, delimitando retas limites para as variações de superelevações e de coeficientes de atrito.

Tangenciada por esses limites, foi adotada uma curva de variação para calcular diretamente os valores de superelevação ao invés de calcular primeiramente os valores de coeficiente de atrito. A curva adotada pelo DNER é expressa por (DNER, 1999, p. 99):

$$e_R = e_{m\acute{a}x} \cdot \left( \frac{2 \cdot R_{m\acute{i}n}}{R} - \frac{R_{m\acute{i}n}^2}{R^2} \right) \quad [5.4]$$

onde:

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

$e_{m\acute{a}x}$  = superelevação máxima admitida para a classe do projeto (%);

$R_{m\acute{i}n}$  = raio mínimo de curva para a velocidade diretriz considerada (m);

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

A adoção dessa curva de variação resulta no acréscimo gradativo e simultâneo dos valores de superelevação e de coeficiente de atrito para contrabalançar o aumento da força centrífuga, à medida que diminuem os raios das concordâncias horizontais.

Nas tabelas 5.5 e 5.6 estão apresentados os valores de superelevação calculados, de acordo com o critério estabelecido pelo DNER, para diferentes exemplares de raios tabelados, considerando as superelevações máximas de 8 % e 10 %, mais comumente utilizadas em projetos de rodovias em áreas rurais.

Nessas tabelas, as superelevações estão limitadas inferiormente pela inclinação transversal de 2 %, que é o valor correspondente ao abaulamento normalmente utilizado para pavimentos betuminosos de boa qualidade.

Tabelas para outros valores de  $e_{m\acute{a}x}$ , considerando diferentes valores de abaulamento e outros raios de curva, poderão ser facilmente construídas utilizando a fórmula [5.4].

Os valores de superelevação obtidos de acordo com o critério estabelecido pelo DNER diferem muito pouco daqueles calculados de acordo com a metodologia mais complexa preconizada pela AASHTO.

**EXEMPLO 5.1 :** A superelevação a ser adotada numa concordância horizontal com raio de curva circular  $R=214,88\text{m}$ , no projeto de uma rodovia nova, em região de relevo ondulado, na Classe II do DNER, poderá ser calculada a partir dos seguintes elementos:

- superelevação máxima:  $e_{m\acute{a}x} = 8,000 \%$  (tabela 2.3);
- raio mínimo de curva:  $R_{m\acute{i}n} = 170,00 \text{ m}$  (tabela 2.3 ou fórmula [5.3]).



### 5.3 SUPERLARGURA

As normas, manuais ou recomendações de projeto geométrico estabelecem as larguras mínimas de faixas de trânsito a adotar para as diferentes classes de projeto, levando em consideração aspectos de ordem prática, tais como as larguras máximas dos veículos de projeto e as respectivas velocidades diretrizes para projeto.

As larguras de faixas de trânsito são fixadas com folgas suficientes em relação à largura máxima dos veículos, de modo a permitir não apenas a acomodação estática desses veículos, mas também suas variações de posicionamento em relação às trajetórias longitudinais, quando trafegam nas faixas, nas velocidades usuais (o que causa essas variações de posicionamento dos veículos?).

Assim, nos trechos em tangente, os usuários de uma rodovia contam com uma certa liberdade de manobra no espaço correspondente à sua faixa de trânsito, o que lhes permite efetuar pequenos desvios e correções de trajetória para ajustes de curso, conferindo-lhes uma certa condição de fluidez ao trafegar na rodovia.

Nos trechos em curva, no entanto, essa condição é alterada, devido a dois fatores principais:

- quando descrevem trajetórias curvas, os veículos ocupam fisicamente espaços laterais maiores que as suas próprias larguras;
- devido a efeitos de deformação visual, causados pela percepção da pista em perspectiva, e devido às dificuldades naturais de operação de um veículo pesado em trajetória curva, os trechos em curva horizontal provocam aparência de estreitamentos da pista à frente dos usuários, provocando sensação de confinamento.

Com a finalidade de compensar esses fatores, os trechos em curva podem ser alargados, de forma a oferecer aos usuários condição de continuidade quanto à sensação de liberdade de manobra ou de condição de fluidez, no que diz respeito à disponibilidade de largura de faixa de trânsito.

Essa largura adicional das faixas de trânsito, para os trechos em curva, é denominada de superlargura, sendo representada pela letra  $s$  (nesta publicação, será utilizada a notação  $s_R$  para indicar a superlargura a adotar em uma concordância horizontal com curva circular de raio  $R$ ).

As superlarguras são calculadas considerando sempre veículos de maior porte, não tendo sentido o cálculo para veículos tipo VP, pois mesmo uma rodovia projetada para este tipo de veículo de projeto deverá permitir a passagem ocasional de um veículo de maior porte.

O veículo básico para a determinação da superlargura a adotar numa concordância horizontal é o veículo tipo CO, pois os demais tipos de veículos, para os raios de curva convencionais e velocidades diretrizes normais, operarão satisfatoriamente com as superlarguras projetadas para atender ao veículo tipo CO. Em casos especiais, os cálculos poderão ser efetuados ou verificados para outros tipos de veículos.

#### 5.3.1 Cálculo da superlargura

Considerando um veículo descrevendo uma trajetória circular, tal como esquematizado na figura 5.3, o DNER estabelece os seguintes critérios para a determinação da superlargura:

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





ou

$$\overline{OZ} = \sqrt{R^2 + B_D \cdot (2 \cdot E_E + B_D)}$$

donde se obtém:

$$G_D = \sqrt{R^2 + B_D \cdot (2 \cdot E_E + B_D)} - R \quad [5.6]$$

onde:

- $G_D$  : gabarito devido ao balanço dianteiro (m);
- $B_D$  : balanço dianteiro (m);
- $E_E$  : distância entre-eixos (m);
- $R$  : raio da curva circular (m);

- dependendo do veículo de projeto<sup>34</sup>, pode-se considerar também um gabarito devido ao balanço traseiro ( $G_T$ ), que é outro acréscimo de largura devido à disposição do veículo na curva, em função do balanço traseiro ( $B_T$ ), medido entre o eixo traseiro e o limite traseiro do veículo;
- estabelece-se, para o veículo, um valor de gabarito lateral ( $G_L$ ), que é a folga lateral livre que deve ser mantida para o veículo de projeto em movimento; o gabarito lateral é fixado em função da largura da faixa de trânsito, de acordo com os valores da tabela 5.7:

TABELA 5.7 – VALORES DE GABARITO LATERAL

Largura de faixa $L_F$ (m)	3,00 – 3,20	3,30 – 3,40	3,50 – 3,60
Gabarito Lateral $G_L$ (m)	0,60	0,75	0,90

Fonte: Manual de projeto geométrico de rodovias rurais (DNER, 1999, p. 76).

- para compensar as dificuldades naturais de manobra em curva e as diferenças entre as características de operação dos motoristas, considera-se para a pista (independentemente do número de faixas de trânsito) um acréscimo de largura adicional ( $F_D$ ), denominado de *folga dinâmica*, dada pela fórmula atribuída a VOSHEL:

$$F_D = \frac{V}{10 \cdot \sqrt{R}} \quad [5.7]$$

onde:

- $F_D$  = folga dinâmica (m);
- $V$  = velocidade diretriz (km/h);
- $R$  = raio da curva circular (m).

Com base nesses critérios, pode-se então determinar a largura total ( $L_T$ ) com a qual deverá ser projetada a pista de uma rodovia em curva, que tenha  $N$  faixas de trânsito, para que os efeitos de ordem estática e dinâmica sobre os usuários, causados pela curvatura, sejam devidamente compensados.

No caso de rodovia com pista simples e duas faixas de trânsito, uma para cada sentido de percurso, observa-se que o gabarito devido ao balanço dianteiro do veículo que percorre a faixa externa não exerce influência sobre o posicionamento dos veículos que se cruzam na curva, podendo ser desconsiderado no cálculo da superlargura.

<sup>34</sup> Para o veículo tipo CO esse acréscimo inexistente, pois a face externa do pneu traseiro coincide com a lateral do veículo.

O mesmo se verifica para o caso de pista dupla, com duas ou mais faixas de trânsito por sentido: para cada pista, o gabarito devido ao balanço dianteiro do veículo que percorre a faixa externa da curva não afeta o posicionamento dos veículos nas demais faixas, podendo ser desconsiderado.

Assim, a largura total ( $L_T$ ) de uma pista em curva, com  $N$  faixas de trânsito, poderá ser calculada por:

$$L_T = N \cdot (G_C + G_L) + (N-1) \cdot G_D + F_D \quad [5.8]$$

com as grandezas já definidas anteriormente.

Como a largura normal da pista em tangente ( $L_N$ ) é dada por:

$$L_N = N \cdot L_F \quad [5.9]$$

onde:

- $L_N$  : largura total da pista em tangente (m);
- $N$  : número de faixas de trânsito na pista;
- $L_F$  : largura de projeto da faixa de trânsito (m);

a superlargura ( $S_R$ ) a adotar para a pista, numa concordância horizontal com raio de curva  $R$ , pode ser finalmente expressa por:

$$S_R = L_T - L_N \quad [5.10]$$

sendo:

- $S_R$  : superlargura para uma pista em curva horizontal (m);
- $L_T$  : largura total de uma pista em curva (m);
- $L_N$  : largura normal de uma pista em tangente (m).

### 5.3.2 Considerações adicionais sobre a superlargura

Nos projetos de rodovias em áreas rurais, o cálculo da superlargura a adotar para as concordâncias horizontais é efetuado considerando, em geral, o veículo tipo CO, cujas características geométricas de interesse, que podem ser obtidas a partir do gabarito de curva apropriado (figura 3.22), são:

- $L_V = 2,60$  m;
- $E_E = 6,10$  m;
- $B_D = 1,20$  m.

Quando se considera um veículo articulado como veículo de projeto, substitui-se, nos cálculos pertinentes, o valor da distância entre-eixos ( $E_E$ ) por uma distância entre-eixos equivalente ( $E_{Eq}$ ), que pode ser calculada por:

$$E_{Eq} = \sqrt{E_1^2 + E_2^2}$$

onde:

- $E_{Eq}$  : distância entre-eixos equivalente para veículos articulados (m);
- $E_1$  : distância entre o eixo dianteiro do veículo trator (cavalo mecânico) e o pivô de apoio do semi-reboque – ou 5ª roda (m);
- $E_2$  : distância da 5ª roda ao eixo traseiro ou ao ponto médio dos eixos traseiros do semi-reboque (m).

Os valores de superlargura que correspondem ao caso básico de pista simples, com duas faixas de trânsito, uma para cada sentido de percurso, obtidos mediante a aplicação das fórmulas já vistas, são diretamente aplicáveis também para o caso de pista dupla (para cada pista), com duas faixas por sentido.

Os valores de superlargura a considerar nos projetos devem ser arredondados para múltiplos de 0,20 m e limitados inferiormente a 0,40 m. As normas do DNER consideram que superlarguras menores que esse limite não resultariam em efeitos práticos relevantes, podendo ser desconsideradas.

A AASHTO adota um limite inferior de 0,60 m, e sugere a dispensa de superlargura<sup>35</sup> para concordâncias com raios de curva superiores a 250 m, nos projetos com largura normal de faixa de 3,60 m (AASHTO, 1995, p. 214).

Para o caso de pistas com mais de duas faixas de trânsito por sentido, o DNER recomenda a redução proporcional dos valores de superlargura, levando em consideração as folgas já propiciadas pelas larguras normais das faixas e a improbabilidade de emparelhamento de 3 ou mais veículos com as dimensões do veículo de projeto nas curvas.

O critério sugerido para tanto consiste em se adotar, para pistas com 3 faixas, o valor de superlargura calculado para o caso básico (de pista com 2 faixas) multiplicado por 1,25; para pistas com 4 faixas, o multiplicador sugerido é de 1,50 (DNER, 1999, p.82). A AASHTO não sugere tais reduções, e recomenda a verificação dos valores calculados de superlargura considerando veículos de dimensões maiores, quando suas participações no tráfego forem relevantes.

Em pistas de duas faixas que disponham de faixa auxiliar – seja 3ª faixa, faixa de desaceleração ou de aceleração, faixa destinada a conversões ou a movimentos de entrelaçamento – essa faixa pode ser desconsiderada na determinação da superlargura, principalmente quando há acostamento externo.

EXEMPLO 5.2 : A superlargura a ser adotada para a concordância horizontal do exemplo 5.1, considerando o veículo tipo CO, pode ser determinada com o uso dos valores e fórmulas já vistos, de acordo com a seguinte seqüência de cálculos:

- gabarito devido à trajetória em curva (fórmula [5.5]):  

$$G_C = 2,60 + 214,88 - \sqrt{214,88^2 - 6,10^2} = 2,69\text{m};$$
  - gabarito devido ao balanço dianteiro curva (fórmula [5.6]):  

$$G_D = \sqrt{214,88^2 + 1,20 \cdot (2 \cdot 6,10 + 1,20)} - 214,88 = 0,04\text{m};$$
  - gabarito lateral (tabela 5.7) para largura de faixa  $L_F = 3,50\text{m}$ :  

$$G_L = 0,90\text{ m};$$
  - folga dinâmica (fórmula [5.7]):  

$$F_D = \frac{70}{10 \cdot \sqrt{214,88}} = 0,48\text{m};$$
  - largura total da pista em curva (fórmula [5.8]):  

$$L_T = 2 \cdot (2,69 + 0,90) + (2 - 1) \cdot 0,04 + 0,48 = 7,70\text{ m};$$
  - largura normal da pista em tangente (fórmula [5.9]):  

$$L_N = 2 \cdot 3,50 = 7,00\text{ m};$$
- chegando-se à superlargura (fórmula [5.10]):  

$$S_R = 7,70 - 7,00 = 0,70\text{ m}.$$

Arredondando o valor encontrado, de acordo com o critério do DNER, para múltiplo de 0,20m, a superlargura a adotar seria, finalmente:

$$S_R = 0,80\text{m}.$$

---

<sup>35</sup> As Normas para o projeto geométrico de estradas de rodagem do DNER dispensavam a consideração da superlargura para concordâncias com  $R > 160\text{ m}$ , nos projetos com larguras de faixa  $L_F \geq 3,50\text{m}$  (DNER, 1975, p. 74); o Manual de projeto geométrico de rodovias rurais, do mesmo órgão, não faz referências diretas a respeito de tal dispensa, deixando os casos de dispensa indicados em tabelas de valores de superlargura para projeto (DNER, 1999, p. 77-81).

### 5.3.3 Disposição da superlargura

Uma vez determinada a superlargura com a qual deverá ser projetada a pista de uma rodovia, numa concordância horizontal, há diferentes critérios para efetuar a repartição deste acréscimo de largura entre as faixas que compõem a pista.

Para simplicidade de raciocínio, imagine-se, de início, o caso de uma rodovia projetada com pista simples, com duas faixas de trânsito, uma para cada sentido de percurso, e eixo de projeto centralizado em relação à pista.

Há basicamente duas formas de disposição da superlargura para o alargamento das faixas de trânsito nos trechos em curva, quais sejam:

- alargamento assimétrico da pista: quando a pista é alargada somente no lado interno da curva, onde se dispõe toda a superlargura;
- alargamento simétrico da pista: quando a pista é alargada igualmente em ambos os lados do eixo, dispondo-se metade da superlargura no lado interno da curva, e a outra metade no lado externo.

Em ambos os casos, uma vez delimitados os bordos da pista alargada, esta é dividida ao meio para a marcação da linha central da pista

Na hipótese de alargamento simétrico da pista, a linha central coincidirá com o eixo de projeto da rodovia; quando se procede, no entanto, ao alargamento assimétrico, a linha central a ser demarcada não mais coincidirá com o eixo de projeto, resultando deslocada para o lado interno da curva.

Coincidente ou não com o eixo de projeto, a linha central constituirá a referência para a sinalização horizontal e para fins construtivos do pavimento.

Assim, a pintura da linha de divisão de fluxos – que coincide com a posição do eixo nos trechos em tangente – será efetuada sobre a linha central, nos trechos em curva.

Da mesma forma, os pavimentos deverão ser construídos de forma a que suas juntas longitudinais e as cristas dos abaulamentos também coincidam com a linha central e não necessariamente com o eixo da rodovia.

O alargamento simétrico da pista tem a vantagem de preservar a posição do eixo original de projeto, mantendo-o para as finalidades construtivas e de operação. Sua utilização é reservada aos casos de concordâncias horizontais com curvas de transição (assunto que será objeto de estudo mais adiante), cuja geometria facilita grandemente essa forma de disposição da superlargura, e permite minimizar os efeitos decorrentes da correção da curvatura horizontal reversa que se poderia criar na linha demarcatória do bordo externo da pista (o leitor é convidado a fazer um desenho esquemático de uma concordância horizontal com curva circular simples, num projeto de rodovia com duas faixas de trânsito em pista simples, considerando alargamentos para ambos os lados do eixo, e a imaginar como poderia ficar a linha que representa o bordo externo da pista).

Numa concordância com curva circular simples deve ser empregado o alargamento assimétrico, pois a linha central da rodovia resultará deslocada para o lado de dentro da curva, gerando a demarcação de uma linha central mais fluente para a trajetória dos usuários, em alguma extensão entre a tangente e a curva (observe o leitor que a tendência natural de um usuário, ao ingressar numa curva, é a de descrever uma trajetória contínua em direção ao limite interno da faixa para tangenciá-lo, sem efetuar manobras bruscas de conversão do volante).

Nos projetos de rodovias em pista simples, mas com mais de uma faixa por sentido, e nos projetos envolvendo pistas duplas, com duas ou mais faixas por sentido, valem basicamente as mesmas considerações feitas anteriormente, devendo as superlarguras ser repartidas igualmente entre as faixas, com as juntas construtivas e pinturas longitudinais coincidindo com as posições dos limites das faixas alargadas.

Apenas no caso de projeto de rodovia em pista dupla, com canteiro central cuja largura, por algum motivo, deva ser mantida constante, poder-se-á estar diante da necessidade de efetuar o alargamento de todas as faixas da pista externa para o lado externo da curva – o que deve ser feito observando-se os mesmos cuidados dispensados para a faixa externa, no alargamento simétrico de uma pista simples.

Esta situação, no entanto, dificilmente se verificará na prática, já que os projetos de rodovias em pista dupla geralmente contemplam o uso de raios de curva e larguras de faixa com dimensões que dispensam a necessidade de consideração de superlarguras.

Mais adiante, quando forem tratados assuntos referentes a curvas de transição, serão retomadas, com maior detalhamento, questões relacionadas com a disposição das superlarguras.









# 6 CURVAS DE TRANSIÇÃO

## 6.1 A GEOMETRIA E A DINÂMICA DE MOVIMENTO

As concordâncias horizontais com curvas circulares simples, quando corretamente projetadas, resultam em traçado fluente e contínuo do eixo, sem descontinuidades do ponto de vista geométrico.

Para os usuários das rodovias, no entanto, essas condições de fluência e de continuidade de traçado resultam prejudicadas nas concordâncias horizontais com curvas circulares simples, devido ao surgimento de forças laterais que atuam sobre os veículos nas curvas, e devido à própria dificuldade natural de dirigir (especialmente os veículos de maior porte) em curvas.

Esses fatores, como já visto no capítulo anterior, têm seus efeitos adversos minimizados com a introdução de superelevações e de superlarguras adequadas nas concordâncias horizontais.

Surge, no entanto, uma nova questão a ser resolvida: como proceder para introduzir a superelevação e a superlargura na pista quando se passa da condição de trecho em tangente para a condição de trecho em curva circular ?

Na concordância com curva circular simples, a passagem da condição de tangente para a de curva circular ocorre de forma instantânea<sup>36</sup>, tanto no PC como no PT, mas é óbvio que não se pode passar abruptamente de uma pista normal em tangente para uma pista superelevada e com superlargura na curva.

Para evitar essa espécie de *choque dinâmico* propiciado pela passagem instantânea de traçado em tangente (com raio infinito e força centrífuga nula) para traçado em curva circular (com raio limitado e força centrífuga constante), são introduzidas curvas especiais, entre a tangente e a curva circular, denominadas *curvas de transição*, projetadas de forma a permitir uma passagem suave entre a condição de trecho em tangente e a de trecho em curva circular.

As normas do DNER somente dispensam o uso de curvas de transição nas concordâncias horizontais com curvas circulares de raios superiores aos valores indicados na tabela 6.1, para as diferentes velocidades diretrizes ali apontadas.

TABELA 6.1 – RAIOS DE CURVA QUE DISPENSAM CURVAS DE TRANSIÇÃO

V (km/h)	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
R (m)	170	300	500	700	950	1.200	1.550	1.900	2.300	2.800

Fonte: Manual de projeto geométrico de rodovias rurais (DNER, 1999, p. 105).

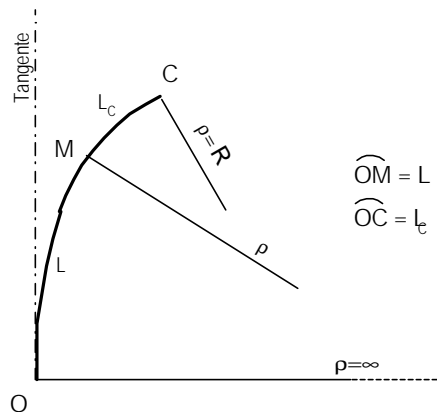
<sup>36</sup> Na prática, essa passagem é suavizada, nas rodovias, devido às dimensões usuais das faixas de trânsito, que propiciam folgas laterais suficientes para a acomodação das trajetórias dos veículos ao largo das faixas, permitindo que os usuários efetuem manobras conversão mais suaves, não de forma instantânea (o que ocorre em relação aos traçados ferroviários?).

## 6.2 A CLOTÓIDE OU ESPIRAL DE TRANSIÇÃO

Como sua própria denominação sugere, uma curva de transição tem a função primária de permitir a passagem gradativa de um traçado em tangente para um traçado em curva circular.

A formulação intuitiva de uma curva apropriada para tanto está representada no esquema da figura 6.1, onde a curva de transição, com origem no ponto O e extremidade no ponto C, tem comprimento total  $L_c$  (mais adiante se verá como se pode determinar esse comprimento), estando inserida entre a tangente e a curva circular.

FIGURA 6.1 – CURVA DE TRANSIÇÃO



A curva de transição, com raio  $\rho_0 = \infty$  na origem, tem raio de curvatura ( $\rho$ ) que diminui gradativamente ao longo do seu comprimento ( $L_c$ ), até atingir, em sua extremidade, o valor  $\rho_c = R$ , igual ao raio da curva circular.

Um critério imediato para estabelecer a equação dessa curva de transição consiste em se imaginar uma geometria tal que a aceleração centrípeta<sup>37</sup> atuante sobre um veículo que se desloque sobre a curva com velocidade linear constante varie gradualmente, ao longo da curva, desde o valor nulo, no início da curva, até atingir o valor máximo, na sua extremidade.

Num ponto M qualquer da curva, onde o raio de curvatura é  $\rho$ , compreendendo um arco de comprimento L, a aceleração centrípeta ( $a_M$ ) que atua sobre um veículo se deslocando com a velocidade tangencial v é dada por:

$$a_M = \frac{v^2}{\rho}$$

A aceleração centrípeta máxima ( $a_c$ ) se verificará na extremidade de curva de transição (no ponto C), onde o raio de curvatura é R, igual ao da curva circular que se segue, pode ser expressa por:

$$a_c = \frac{v^2}{R}$$

Admitindo-se a variação linear da aceleração ao longo da curva de transição, ter-se-á:

$$\frac{a_M}{a_c} = \frac{L}{L_c}$$

ou, substituindo as acelerações centrípetas pelas respectivas expressões vistas anteriormente:

$$\frac{v^2/\rho}{v^2/R} = \frac{L}{L_c}$$

<sup>37</sup> A ação da aceleração centrípeta corresponde a reação representada pela aceleração centrífuga que, atuando sobre a massa do veículo em movimento, resulta na força centrífuga.

que resulta, simplificando:

$$\rho \cdot L = R \cdot L_C \quad [6.1]$$

Numa concordância horizontal, os valores do raio  $R$  e do comprimento total  $L_C$  da curva de transição são previamente fixados e, portanto, constantes.

Representando a constante que resulta do produto  $(R \cdot L_C)$  pela grandeza positiva  $A^2$ , a equação acima pode ser escrita na forma conhecida como *equação espontânea da espiral de transição*, dada por:

$$\rho \cdot L = A^2 \quad [6.2]$$

onde:

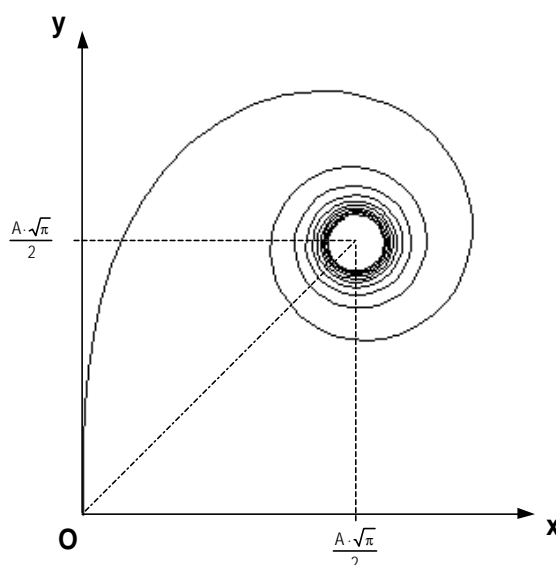
$\rho$  : raio de curvatura num ponto qualquer da curva de transição (m);

$L$  : comprimento da curva de transição, da origem até o ponto considerado (m);

$A^2$  : constante positiva ( $m^2$ ).

A equação [6.2] é a expressão analítica da Clotóide, que tem a forma geométrica de uma espiral, tal como representada na figura 6.2.

FIGURA 6.2 – FORMA GEOMÉTRICA DA CLOTÓIDE OU ESPIRAL DE TRANSIÇÃO



Na literatura referente a projetos geométricos, esta curva é também conhecida como *espiral de Van Leber*, *espiral de Cornu*, *espiral de Euler* ou *Radióide aos arcos*; esta última denominação é devida ao fato de se ter admitido variações lineares de parâmetros da concordância, ao longo da curva de transição, proporcionalmente aos comprimentos dos arcos<sup>38</sup>.

### 6.3 TIPOS DE TRANSIÇÃO

A introdução de espirais de transição nas concordâncias horizontais pode ser efetuada de três maneiras, gerando os diferentes tipos de transição conhecidos, que são:

- a transição a raio e centro conservados;

<sup>38</sup> As proporcionalidades poderiam ter sido estabelecidas em função dos raios vetores, no caso de definição de pontos da curva por coordenadas polares, ou em função de abscissas tomadas paralelamente à tangente, no caso de definição da curva por coordenadas cartesianas, gerando, respectivamente, as curvas conhecidas como *Lemniscata de Bernoulli* e *Curva Elástica* (qual a lógica aparente que ajuda a explicar a escolha da Clotóide pelas normas do DNER, em detrimento das duas outras curvas citadas?)

- a transição a raio conservado; e
- a transição a centro conservado.

Em todos os casos, pode-se imaginar, para fins de raciocínio, uma concordância inicialmente feita com uma curva circular simples, de raio  $R$ , concordância esta que é aperfeiçoada mediante a inserção de espirais de transição entre as tangentes e a curva circular.

A inserção das espirais somente poderá ser feita mediante o afastamento da curva circular em relação às tangentes que se interceptam no  $PI$ , o que demanda alguns ajustamentos na geometria da concordância inicial, modificando necessariamente algumas das suas condições.

### 6.3.1 Transição a raio e centro conservados

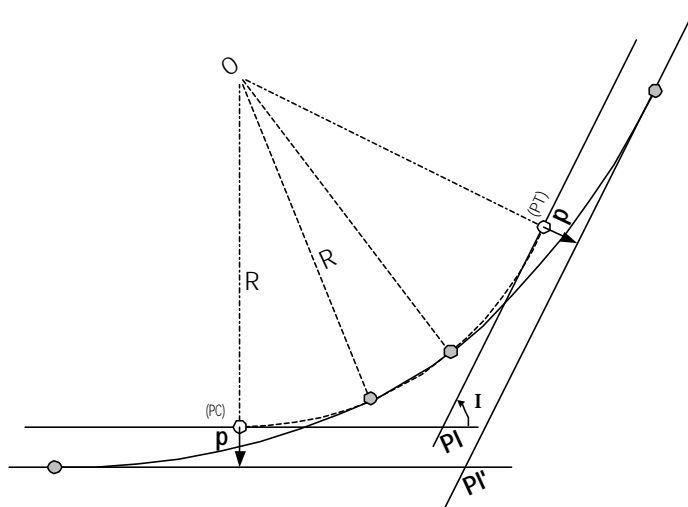
Neste tipo de transição, que está ilustrado esquematicamente na figura 6.3, procura-se inserir as duas espirais sem modificações no raio da curva circular nem na sua posição.

É fácil perceber visualmente, observando a disposição da figura 6.3, que isto só é possível com a diminuição do trecho em curva circular, e com o afastamento das tangentes em relação à posição da curva circular (esta constatação pode ser confirmada analiticamente).

À vantagem de se conseguir manter o raio da curva circular e ao menos parte do traçado inicial do trecho em curva circular (em que situações isto pode ser vantajoso?), contrapõe-se a necessidade de se deslocar as tangentes para a acomodação das espirais.

O deslocamento das tangentes implica na necessidade de modificações nas duas concordâncias adjacentes, causando óbvios transtornos.

FIGURA 6.3 – TRANSIÇÃO A RAIO E CENTRO CONSERVADOS



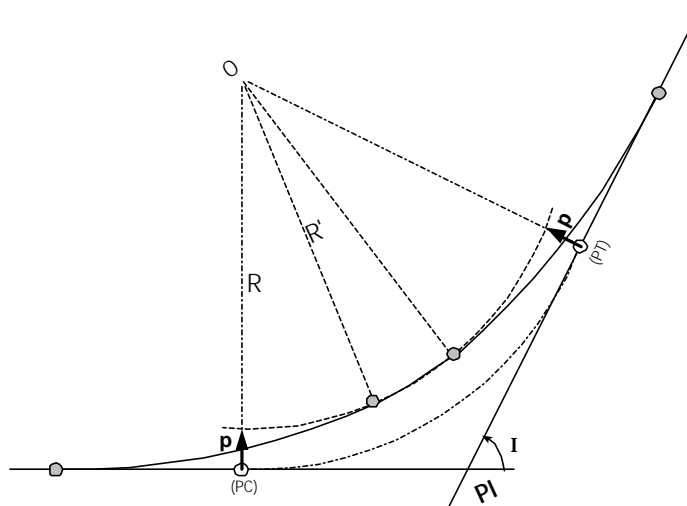
A utilização deste tipo de concordância só se justifica quando não se pode evitar um ponto obrigado situado sobre a curva circular original.

### 6.3.2 Transição a centro conservado

Evitando o deslocamento das tangentes para a inserção das espirais de transição, este tipo de transição preconiza o afastamento da curva circular, em relação às tangentes, mediante a redução do raio da curva circular em valor igual ao do afastamento necessário à acomodação dos ramos de espiral, mantendo-se inalterada a posição do centro da curva circular original, tal como se ilustra no esquema da figura 6.4.

A manutenção do posicionamento das tangentes é uma vantagem clara que este tipo de transição apresenta em relação ao anterior. No entanto, a manutenção simultânea do centro da curva circular demanda a redução do raio da curva original para viabilizar o seu afastamento em relação às tangentes, conforme se pode constatar a partir da observação do esquema da figura 6.4.

FIGURA 6.4 – TRANSIÇÃO A CENTRO CONSERVADO



A necessidade de redução do raio da curva circular e o conseqüente deslocamento do traçado em curva original para o lado de dentro da concordância são as principais desvantagens decorrentes do uso deste tipo de transição. A mais significativa é a redução do raio de curva, pois geralmente a escolha do raio original é feita com algum propósito relevante (por exemplo, a escolha de um raio fracionário tal que resulte em deflexões inteiras). O deslocamento do traçado em curva é relativamente pequeno e não representa, em geral, transtornos significativos, exceto quando há pontos obrigados a serem atingidos pelo traçado.

O fato de se manter o centro da curva circular na posição original não representa vantagem relevante, já que o centro não é utilizado para quaisquer fins práticos de locação ou de controle do eixo.

### 6.3.3 Transição a raio conservado

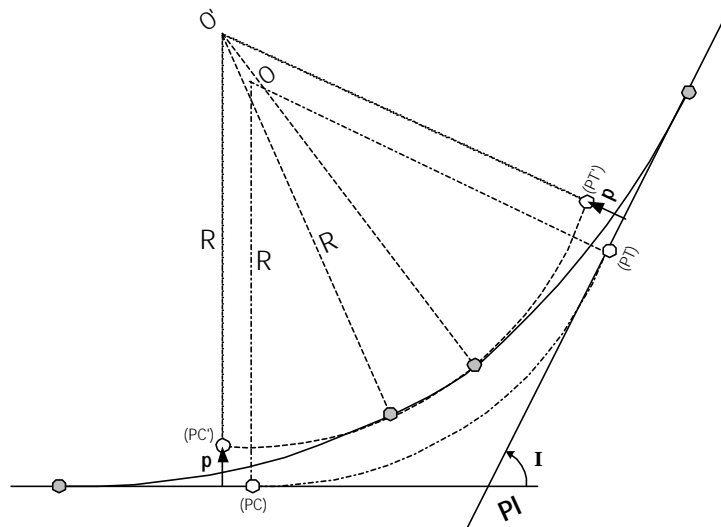
A inserção das espirais de transição sem alterar a posição das tangentes pode também ser feita sem que seja alterado o raio da curva circular.

Isto implica, naturalmente, na necessidade de deslocamento da curva circular para o lado de dentro da concordância, para que se dê o afastamento necessário à acomodação dos ramos de espiral, o que reduz também a extensão do trecho em curva circular, como se pode observar no esquema da figura 6.5.

Sendo mantido o raio da curva circular, o afastamento da curva implica também no deslocamento do centro da curva – o que não afeta a qualidade da concordância. O próprio deslocamento da curva, a exemplo do que ocorre no tipo de transição anterior, é relativamente pequeno e, exceto nas situações especiais já comentadas, não representa transtornos significativos na prática.

A vantagem de possibilitar a manutenção do raio da curva circular no valor originalmente desejado, sem alterar a posição das tangentes que se interceptam, torna este tipo de transição o preferido para uso normal nos projetos das concordâncias. Os outros tipos têm utilização esporádica, em casos especiais.

FIGURA 6.5 – TRANSIÇÃO A RAIOS CONSERVADOS



As fórmulas e procedimentos de cálculo para o projeto da transição a raios conservados, que serão vistos detalhadamente mais adiante, são facilmente adaptáveis para o projeto dos outros tipos de transição.

#### 6.4 ESQUEMA DA TRANSIÇÃO COM A ESPIRAL

Com a inserção de dois ramos de espiral entre a curva circular e as tangentes adjacentes, a concordância com curva de transição apresenta 4 pontos singulares a serem definidos (ao invés do PC e do PT, no caso da concordância com curva circular simples), correspondentes aos pontos de contato das tangentes com as espirais e destas com a curva circular.

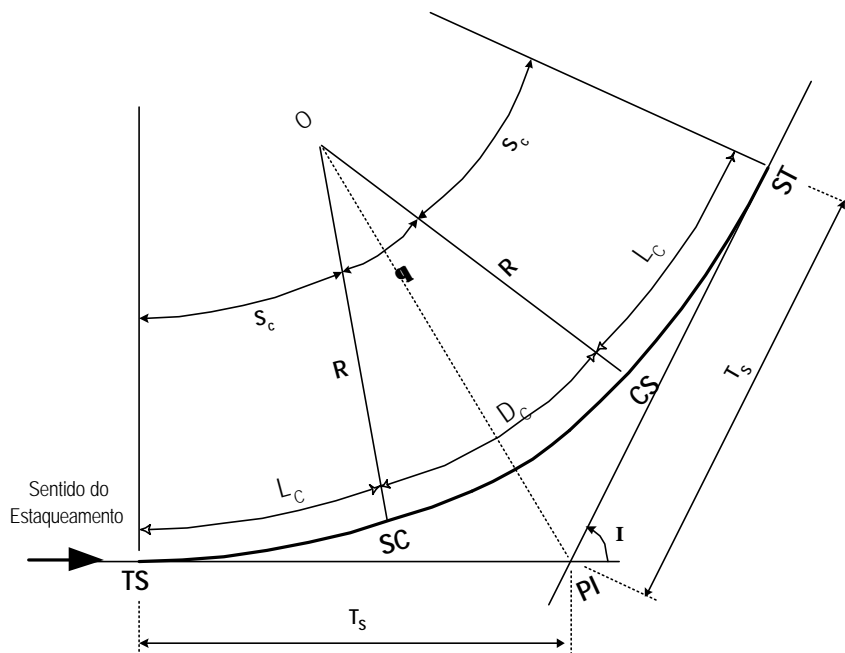
Na figura 6.6 está representado o esquema de uma concordância com espiral de transição, envolvendo o caso básico em que os dois ramos de espiral são iguais, resultando numa concordância simétrica.

Observado o sentido de percurso (sentido de estaqueamento) assinalado nessa figura, os 4 pontos singulares referidos são designados<sup>39</sup>, pela ordem, por:

- TS (sigla oriunda da denominação original, em inglês, *Tangent – to – Spiral*), que corresponde ao início da concordância horizontal, no ponto de passagem da tangente para a espiral;
- SC (*Spiral – to – Curve*), no ponto de passagem da espiral para a curva circular, onde o raio de curva é comum;
- CS (*Curve – to – Spiral*), na passagem da curva circular para a espiral, onde o raio de curva ainda é o mesmo;
- ST (*Spiral – to – Tangent*), no final da concordância horizontal, na passagem da espiral para a tangente.

<sup>39</sup> Há projetistas que preferem identificar estes pontos singulares do eixo pelas siglas TE, EC, CE e ET, formadas pelas letras iniciais das designações em português da Tangente, da Espiral e da (curva) Circular; outros acrescentam ao primeiro ponto singular as letras E ou D, indicando tratar-se de concordância à esquerda ou à direita, respectivamente, podendo resultar no uso das designações T SE, TSD, TEE ou TED.

FIGURA 6.6 – ESQUEMA DA CONCORDÂNCIA COM ESPIRAL DE TRANSIÇÃO



Além desses pontos singulares, outros parâmetros relevantes, cuja caracterização é necessária para se definir geometricamente a concordância com espiral de transição, são os seguintes, todos indicados na figura 6.6:

- PI : ponto de interseção (das tangentes);
- I : ângulo de deflexão;
- O : centro da curva circular;
- R : raio da curva circular (m);
- $T_s$  : tangente externa ou exterior (m);
- $L_c$  : comprimento da espiral (m);
- $D_c$  : comprimento da (ou desenvolvimento em) curva circular (m);
- $S_c$  : ângulo central correspondente a um ramo da espiral;
- $\theta$  : ângulo central correspondente à curva circular.

As fórmulas para o cálculo das concordâncias com espirais de transição serão vistas mais adiante (no item 6.7), após a definição de alguns procedimentos preliminares necessários à definição dos tamanhos de espiral a utilizar nas concordâncias.

## 6.5 DESENVOLVIMENTO DA SUPERLARGURA E DA SUPERELEVAÇÃO

Definida a curva de transição, a superelevação e a superlargura podem ser distribuídas linearmente ao longo do comprimento dessa curva, caso o seu comprimento seja suficiente para tanto.

A definição do comprimento da curva de transição será tratada no item 6.6 a seguir. Admita-se, por ora, para fins de entendimento dos processos de cálculo para a distribuição da superlargura e da superelevação, que tenha sido definido o comprimento adequado ao longo do qual a distribuição será efetuada, e que seja esse o comprimento  $L_c$  tomado para a curva de transição.

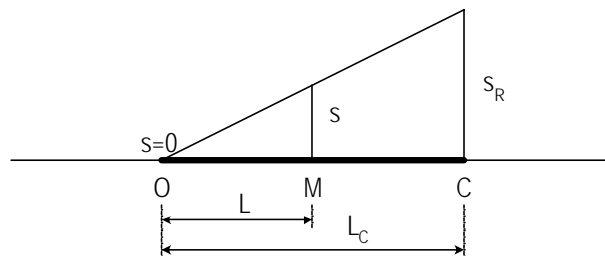
### 6.5.1 Desenvolvimento com curva de transição

Sendo  $L_C$  o comprimento da curva de transição, a superelevação e a superlargura serão desenvolvidas linearmente ao longo desse comprimento, passando dos valores nulos que correspondem às necessidades da condição de tangente aos valores plenos a serem aplicados para a condição de curva circular.

#### 6.5.1.1 Desenvolvimento da superlargura

O desenvolvimento da superlargura é a mais simples, bastando fazê-la passar do valor de superlargura zero, no início da curva de transição, ao valor de superlargura  $s_R$  que será adotado na curva circular, na extremidade da curva de transição, de forma linear, conforme esquematizado no diagrama da figura 6.7.

FIGURA 6.7 – DESENVOLVIMENTO DA SUPERLARGURA



O valor da superlargura ( $s$ ) em um ponto  $M$  qualquer, que dista de um arco de comprimento  $L$  da origem da curva de transição, poderá ser determinado por simples proporção, pois:

$$\frac{s}{s_R} = \frac{L}{L_C}$$

resultando:

$$s = s_R \cdot \frac{L}{L_C} \quad [6.3]$$

onde:

- $s$  : superlargura num ponto qualquer da curva de transição (m);
- $s_R$  : superlargura na curva circular (m);
- $L$  : distância do ponto ao início da curva de transição (m);
- $L_C$  : comprimento da curva de transição.

**EXEMPLO 6.1** : Imagine-se que tenha sido projetada, para o  $PI_1$  dos alinhamentos representados na figura 4.3, uma nova concordância horizontal, nas seguintes condições:

- projeto de rodovia nova em região de relevo ondulado;
- projeto na Classe II do DNER;
- concordância com curva de transição (vide tabela 6.1);
- raio de curva circular  $R_1 = 214,88\text{m}$ ;
- comprimento da curva de transição  $L_{C1} = 50,00\text{m}$ .

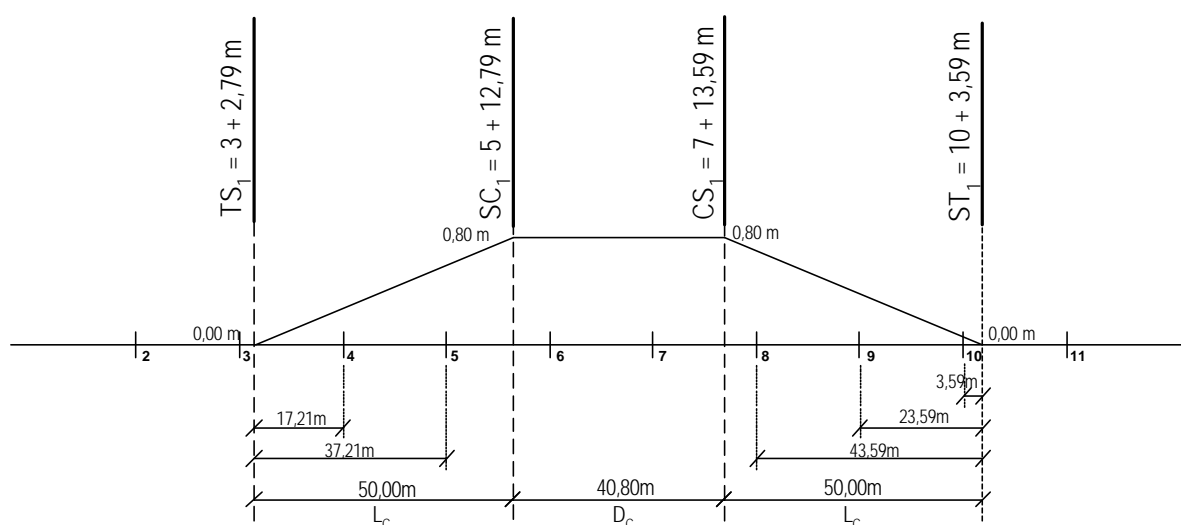


Admitindo-se que se tenha determinado o seguinte posicionamento dos pontos singulares da concordância:  $TS_1 = 3 + 2,79\text{m}$ ,  $SC_1 = 5 + 12,79\text{m}$ ,  $CS_1 = 7 + 13,59\text{m}$  e  $ST_1 = 10 + 3,59\text{m}$ , pode-se determinar o valor da superlargura a adotar em qualquer ponto do eixo, ao longo da concordância.

Do exemplo 5.2 infere-se que a superlargura a adotar para a curva circular utilizada na concordância é  $s_R = 0,80\text{m}$ .

A partir dessas condicionantes, pode-se desenhar o esquema do desenvolvimento da superlargura ao longo da concordância, tal como representado na figura 6.8.

FIGURA 6.8 – DESENVOLVIMENTO DA SUPERLARGURA COM CURVA DE TRANSIÇÃO



Os valores de superlargura ao longo da concordância (considerando, para maior simplicidade, apenas as estacas inteiras) podem ser calculados de acordo com a fórmula [6.9], resultando:

$$\begin{aligned}
 S_{4+0,00\text{m}} &= (17,21 / 50,00) \cdot 0,80 = 0,28\text{m}; \\
 S_{5+0,00\text{m}} &= (37,21 / 50,00) \cdot 0,80 = 0,60\text{m}; \\
 S_{6+0,00\text{m}} &= (\text{na curva circular}) = 0,80\text{m}; \\
 S_{7+0,00\text{m}} &= (\text{na curva circular}) = 0,80\text{m}; \\
 S_{8+0,00\text{m}} &= (43,59 / 50,00) \cdot 0,80 = 0,70\text{m}; \\
 S_{9+0,00\text{m}} &= (23,59 / 50,00) \cdot 0,80 = 0,38\text{m}; \\
 S_{10+0,00\text{m}} &= (3,59 / 50,00) \cdot 0,80 = 0,06\text{m}.
 \end{aligned}$$

#### 6.5.1.2 Desenvolvimento da superelevação

O critério para o desenvolvimento da superelevação é basicamente o mesmo que o adotado para o desenvolvimento da superlargura, consistindo em fazê-la passar linearmente do valor de superelevação zero, no início da curva de transição, ao valor da superelevação plena  $e_R$  a ser adotada na curva circular, na extremidade da curva de transição.

Mas, neste caso, há um fator adicional a ser considerado, que é a questão da existência do abaulamento da pista, adotado nos trechos em tangente.

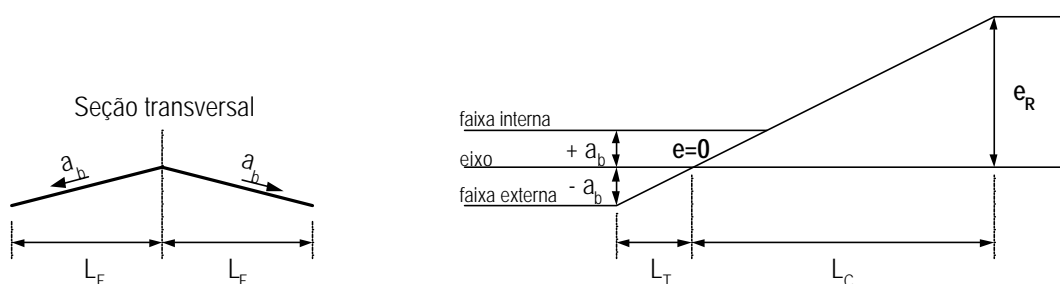
Imagine-se, para fins de raciocínio, o caso de rodovia em pista simples com duas faixas de trânsito, uma para cada lado do eixo, e abaulamento  $a_b$ , com crista coincidente com o eixo, sendo as faixas inclinadas transversalmente para fora da pista, conforme representado na figura 6.9.

Qualquer que seja o sentido da curva, observa-se que, devido ao abaulamento, a faixa do lado interno da curva já está inclinada no sentido correto da superelevação, antes mesmo do início da curva de transição.

A faixa do lado externo da curva, no entanto, tem inclinação no sentido contrário ao da superelevação, devendo então tal inclinação contrária ser gradualmente reduzida ainda na tangente, de forma a que a inclinação resulte nula ao se atingir o início da curva de transição.

Assim, para o caso da faixa externa, além do desenvolvimento da superelevação ( $e_R$ ) a ser feito ao longo do comprimento da curva de transição ( $L_C$ ), há também outro desenvolvimento – o do abaulamento  $a_b$  – a ser feito na aproximação da curva, ainda na tangente, ao longo de um comprimento ( $L_T$ ) que é denominado de comprimento de transição em tangente, em contraposição à denominação do comprimento de transição em curva ( $L_C$ ).

FIGURA 6.9 – DESENVOLVIMENTO DA SUPERELEVAÇÃO



O desenvolvimento da inclinação contrária da faixa externa, do valor  $a_b$  até zero, é feito de forma linear, ao longo do comprimento de transição em tangente, com o mesmo ritmo de variação do desenvolvimento da superelevação ao longo da transição em curva.

Esse critério está representado esquematicamente do diagrama da figura 6.8, onde as inclinações transversais negativas representam as correspondentes à faixa externa, nos trechos em tangente, devidas ao abaulamento.

O comprimento de transição em tangente pode ser calculado por simples proporção, observando-se o diagrama da figura 6.9, de onde se infere que:

$$\frac{L_T}{L_C} = \frac{|a_b|}{e_R}$$

ou:

$$L_T = L_C \cdot \frac{|a_b|}{e_R} \quad [6.4]$$

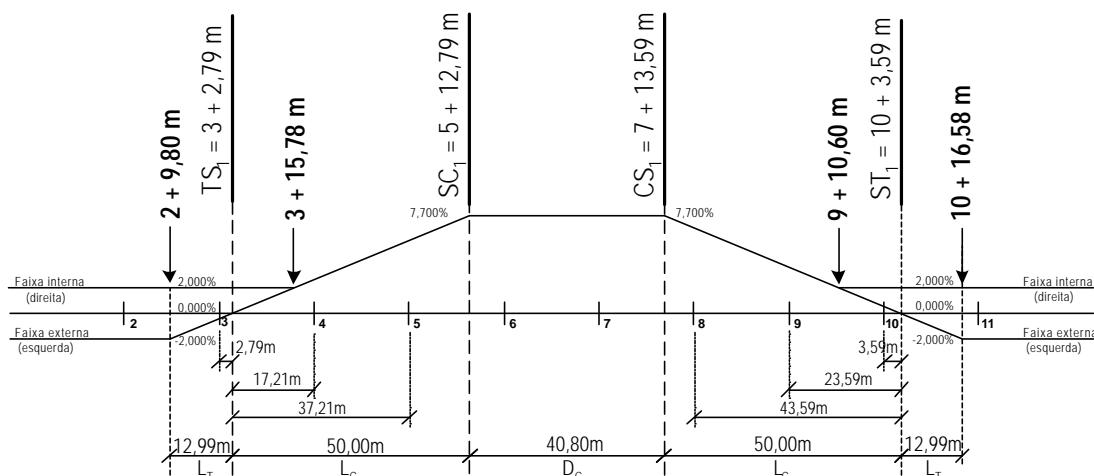
onde:

- $L_T$  : comprimento de transição em tangente (m);
- $L_C$  : comprimento de transição em curva (m);
- $a_b$  : abaulamento (%);
- $e_R$  : superelevação na curva circular (%).

O cálculo da superelevação (ou das inclinações a adotar para as faixas interna e externa) em qualquer ponto da tangente ou da curva de transição poderá ser feito imediatamente, por simples proporção, a partir do diagrama da figura 6.9.

**EXEMPLO 6.2** : Considerando a mesma concordância horizontal do exemplo 6.1, pode-se elaborar um diagrama correspondente ao desenvolvimento da superelevação ao longo da concordância, tal como o representado na figura 6.10 (incentiva-se o leitor a reproduzir o diagrama, para melhor entendimento).

FIGURA 6.10 – DESENVOLVIMENTO DA SUPERELEVAÇÃO COM CURVA DE TRANSIÇÃO



As inclinações transversais da pista nas estacas inteiras ao longo da concordância (assim como em quaisquer outros pontos do eixo) podem ser determinadas calculando-se as proporções:

$$e_{3+0,00m} = (2,79 / 12,99) \cdot (-2,000) = -0,430 \% \text{ (faixa esquerda);}$$

$$e_{3+0,00m} = 2,000 \% \text{ (faixa direita, por leitura direta);}$$

$$e_{4+0,00m} = (17,21 / 50,00) \cdot 7,700 = 2,650 \% \text{ (ambas as faixas);}$$

$$e_{5+0,00m} = (37,21 / 50,00) \cdot 7,700 = 5,730 \% \text{ (ambas as faixas);}$$

$$e_{6+0,00m} = 7,700 \% \text{ (ambas as faixas, curva circular);}$$

$$e_{7+0,00m} = 7,700 \% \text{ (ambas as faixas, curva circular);}$$

$$e_{8+0,00m} = (43,59 / 50,00) \cdot 7,700 = 6,713 \% \text{ (ambas as faixas);}$$

$$e_{9+0,00m} = (23,59 / 50,00) \cdot 7,700 = 3,633 \% \text{ (ambas as faixas);}$$

$$e_{10+0,00m} = (3,59 / 50,00) \cdot 7,700 = 0,553 \% \text{ (faixa esquerda);}$$

$$e_{10+0,00m} = 2,000 \% \text{ (faixa direita, por leitura direta).}$$

### 6.5.2 Desenvolvimento sem curva de transição

O princípio de se efetuar a distribuição da superlargura e da superelevação ao longo das curvas de transição baseia-se na idéia de aproveitar a mesma extensão para a variação gradativa das condições típicas de tangente para as de curva circular.

Há casos, no entanto, em que se deseja manter uma concordância com curva circular simples no projeto do eixo de uma rodovia, dispensando o uso de curvas de transição.

Isso não impede que os veículos continuem a descrever trajetórias naturais de transição nas aproximações (e nos afastamentos) das curvas, pois as larguras normais das faixas de trânsito permitem que os motoristas acomodem os posicionamentos dos veículos desde as tangentes, ao se aproximarem das curvas, tendendo a tangenciar os bordos internos das faixas de percurso nas curvas.

Nas concordâncias com curvas circulares simples procura-se efetuar o desenvolvimento da superlargura e da superelevação de forma a compatibilizar a variação dessas características das seções transversais com as trajetórias naturais de transição dos veículos, e de forma a que os usuários

não sejam submetidos a esforços laterais significativos devidos a inclinações adversas das faixas, nas aproximações dos trechos em curva.

Os comprimentos de transição, ou seja, as extensões ao longo das quais se pode proceder ao desenvolvimento da superlargura e da superelevação, são os mesmos aplicáveis para o caso de se contar com curvas de transição (ver item 6.6 a seguir). Mudam apenas os critérios para o posicionamento dessas extensões em relação às curvas circulares.

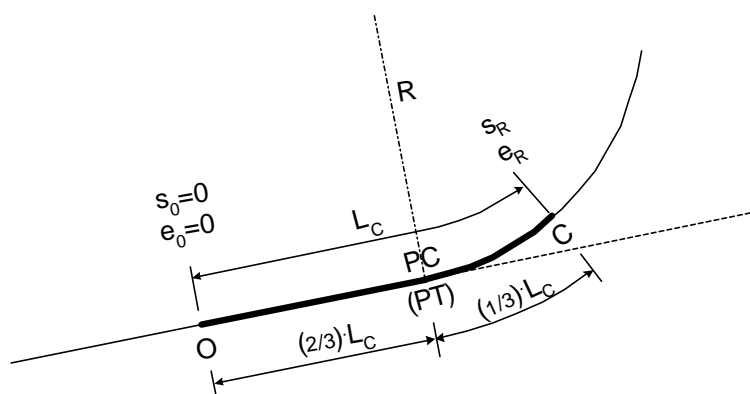
A prática internacional tem demonstrado que um bom critério é assegurar que cerca de 60% a 70% da transição seja efetuada na tangente, sendo a extensão restante completada na curva circular.

Em outras palavras, o critério recomendado para o desenvolvimento da superelevação e da superlargura, numa concordância com curva circular simples, é fazê-lo ao longo de um comprimento de transição ( $L_C$ ), disposto de forma a que cerca de  $2/3$  desse comprimento de localize na tangente e o restante na curva circular, utilizando o PC (e o PT) para o posicionamento desse comprimento de transição, conforme ilustrado na figura 6.11.

As proporções de disposição não são exatas, sendo recomendável efetuar pequenos ajustes no posicionamento do comprimento de transição  $L_C$  de forma a evitar comprimentos fracionários, fazendo, quando possível, que o início e o término da transição coincidam com estacas inteiras ou múltiplas de 10,00m.

Fixados o comprimento de transição e o seu posicionamento no eixo de projeto, o desenvolvimento da superelevação e da superlargura é feito de forma idêntica ao já visto anteriormente, para o caso de concordâncias com curvas de transição.

FIGURA 6.11 – DESENVOLVIMENTO DA SUPERLARGURA E DA SUPERELEVAÇÃO SEM CURVA DE TRANSIÇÃO



**EXEMPLO 6.3 :** A concordância horizontal com curva circular simples descrita no exemplo 4.8 foi calculada com raio  $R_1 = 214,88\text{m}$ , tendo os pontos singulares da concordância resultado nas estacas:  $PC_1 = 4 + 7,88\text{m}$  e  $PT_1 = 8 + 18,68\text{m}$  (o leitor verificou os cálculos?).

Tomando-se esta concordância apenas para fins de ilustração<sup>40</sup> do critério de desenvolvimento da superlargura e da superelevação nas concordâncias com curvas circulares simples (sem curva de transição), imagine-se que seja utilizado o comprimento de transição  $L_C = 50,00\text{m}$ .

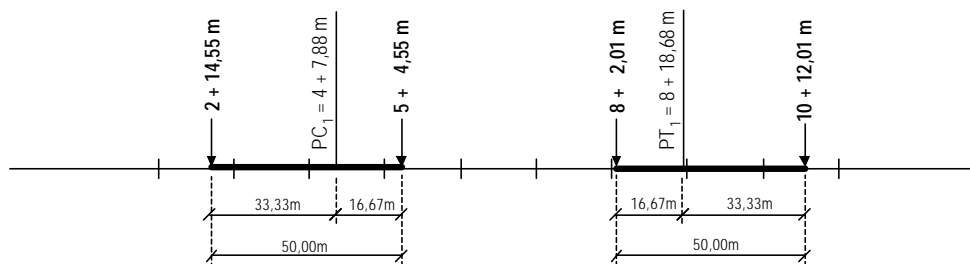
<sup>40</sup> Num projeto real, para velocidade diretriz superior a 30 km/h, esta concordância teria que ser efetuada obrigatoriamente com curva de transição (vide tabela 6.1).

De acordo com o critério descrito, na concordância com curva circular simples, este comprimento de transição deverá ser disposto em torno do  $PC_1$  e do  $PT_1$  da seguinte forma:

- $(2/3) \cdot 50,00 = 33,33$  m na tangente;
- $(1/3) \cdot 50,00 = 16,67$  m na curva circular.

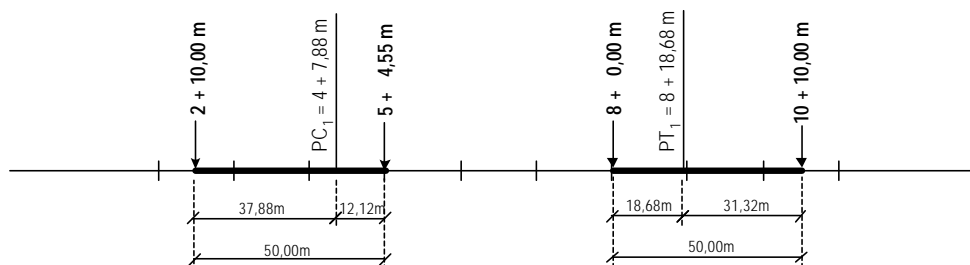
Se fosse adotado esse rateio exato, os comprimentos de transição (ao longo dos quais se faria o desenvolvimento da superlargura e da superelevação) resultariam dispostos na forma indicada esquematicamente na figura 6.12.

FIGURA 6.12 – TRANSIÇÃO EM CURVA CIRCULAR :  $L_C$  DISPOSTO EM ESTACAS FRACIONÁRIAS



Caso se optasse por efetuar pequenos ajustes nas proporções, de forma a que o início e o término do comprimento de transição coincidisse com estacas inteiras (ou múltiplas de 10,00m), em ambas as extremidades da concordância, os comprimentos de transição resultariam dispostos de acordo com o esquema indicado na figura 6.13.

FIGURA 6.13 – TRANSIÇÃO EM CURVA CIRCULAR:  $L_C$  DISPOSTO EM ESTACAS INTEIRAS



Esta última disposição, em que pese a vantagem de coincidência dos pontos de início e de fim da transição com estacas inteiras ou múltiplas de 10,00m, apresentaria a desvantagem de resultar em transição assimétrica, em termos de disposição dos elementos em planta e em seção transversal.

## 6.6 COMPRIMENTO DE TRANSIÇÃO

O comprimento de transição é a distância ao longo da qual se procede à distribuição da superelevação (e, por conveniência, também à da superlargura), passando -a da condição de tangente, onde tem valor nulo, à condição de curva circular, onde assume o valor definido para o raio da curva.

Quando se projeta uma concordância horizontal com curva de transição (geralmente uma espiral), utiliza-se logicamente, como já visto, o comprimento dessa espiral para se efetuar a distribuição da superelevação e da superlargura, motivo pelo qual se confunde, usualmente, a designação de *comprimento de transição* com a de *comprimento da curva de transição* ( $L_C$ ).

A determinação do comprimento de transição é feita, para cada concordância, observando-se limites estabelecidos em normas ou recomendações.

O DNER estabelece critérios objetivos para fixar os comprimentos mínimos e máximos admissíveis para os comprimentos de transição, recomendando que sejam também observados alguns critérios complementares na determinação dos comprimentos de transição – e, conseqüentemente, dos comprimentos das curvas de transição – a serem utilizados nas concordâncias horizontais.

### 6.6.1 Comprimento mínimo de transição

Os comprimentos de transição devem propiciar condições para que a passagem da condição de tangente para a de curva circular (e vice-versa) ocorra de forma suave e gradativa. Comprimentos demasiadamente pequenos praticamente não ensejariam a transição desejada, pois a passagem ocorreria de forma abrupta.

Os limites mínimos para os comprimentos de transição são estabelecidos em função de aspectos relacionados com o conforto e a segurança dos usuários, com a estética (aparência da rodovia) e com fatores de ordem prática, sobre os quais se fundamentam os critérios do DNER.

#### 6.6.1.1 Critério do comprimento mínimo absoluto

Para fins práticos, o menor comprimento de transição admissível é de 30 m ou o equivalente à distância percorrida por um veículo, na velocidade diretriz, no tempo de 2 segundos, prevalecendo o maior.

Comprimentos de transição inferiores não teriam resultados práticos desejáveis, podendo introduzir distorções visíveis nos bordos da pista, comprometendo esteticamente a rodovia.

Representando por  $v$  a velocidade diretriz em m/s, o comprimento mínimo, equivalente à distância percorrida no tempo  $t = 2$  s, será:

$$L_{\min} = t \cdot v = 2 \cdot v$$

ou, expressando a velocidade em km/h:

$$L_{\min} = 2 \cdot \frac{V}{3,6}$$

$$L_{\min} = 0,56 \cdot V \quad [6.5]$$

onde:

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

$V$  : velocidade diretriz (km/h),

Lembrando que:

$$L_{\min} \geq 30 \text{ m} \quad [6.6]$$

#### 6.6.1.2 Critério da fluência ótica

Aplicável somente para curvas com raios grandes, superiores a 800 m, este critério estabelece um comprimento mínimo de transição dado por:

$$L_{\min} = \frac{1}{9} \cdot R \quad [6.7]$$

onde:

$L_{\min}$  : comprimento mínimo de transição para  $R > 800$ m (m);

$R$  : raio da curva circular (m).

### 6.6.1.3 Critério do conforto

Também denominado por *critério da taxa máxima de variação da aceleração centrífuga* pelo DNER, este critério procura determinar o menor comprimento admissível para a transição, de modo a não sujeitar os usuários a sensações de desconforto e insegurança devidas à rapidez da passagem da condição de tangente para a de curva circular.

O grau de desconforto dos usuários é indicado empiricamente pela *taxa de variação da aceleração centrífuga*<sup>41</sup>, ou *solavanco transversal*, grandeza que expressa o quanto varia a aceleração transversal por unidade de tempo ao longo da transição.

Ao atingir a curva circular de raio R, um veículo estará sobre uma pista inclinada transversalmente com a superelevação  $e_R$ .

No capítulo anterior já foi visto o critério de balanceamento entre as forças laterais devidas à superelevação e ao atrito lateral, estabelecido de forma a que a soma dessas forças equilibre o efeito da força centrífuga, conforme expresso matematicamente na fórmula [5.1].

A força lateral devida à superelevação anula apenas parte da força centrífuga, e a diferença remanescente atua sobre o veículo.

Assim, os passageiros (e as cargas), que estão incorporados à massa do veículo em movimento, experimentam apenas os efeitos devidos à diferença de forças supracitada.

Essa diferença de forças, projetada num plano paralelo ao da pista superelevada, equivale ao módulo da força de atrito, conforme se pode deduzir a partir da fórmula [5.1], ou seja:

$$f \cdot P \cdot \cos(\alpha) = \frac{P \cdot v^2}{g \cdot R} \cdot \cos(\alpha) - P \cdot \sin(\alpha) = (F_a)$$

Lembrando que essas forças atuam de fato horizontalmente, o módulo da força transversal horizontal ( $F_T$ ) que é efetivamente sentida pelos passageiros (e pelas cargas) pode ser obtido dividindo-se as parcelas da equação acima por  $\cos(\alpha)$ , obtendo-se:

$$F_T = f \cdot P = \frac{P \cdot v^2}{g \cdot R} - P \cdot \operatorname{tg}(\alpha)$$

A aceleração transversal ( $a_T$ ) correspondente a esa força transversal é obtida dividindo-se a força transversal pela massa (m) do veículo, ou seja:

$$a_T = \frac{F_T}{m}$$

Sendo a massa do veículo equivalente ao seu peso dividido pela aceleração normal da gravidade, e representando  $\operatorname{tg}(\alpha)$  pela notação de superelevação ( $e_R$ ), pode-se elaborar as expressões anteriores para se chegar a:

$$a_T = \frac{F_T}{\frac{P}{g}} = \left[ \frac{P \cdot v^2}{g \cdot R} - P \cdot \operatorname{tg}(\alpha) \right] \cdot \frac{g}{P}$$

ou, simplificando:

$$a_T = \frac{v^2}{R} - g \cdot e_R$$

O solavanco transversal, ou taxa de variação da aceleração transversal (C) é, por definição, dado pela divisão do valor da variação da aceleração transversal, experimentada ao se passar da condição de tangente à de curva circular, pelo tempo (t) em que se verifica essa variação, ou seja:

<sup>41</sup> Esta denominação é um tanto imprópria, pois sugere que a aceleração transversal ("sentida" pelos usuários e pelas cargas) seria devida apenas à força centrífuga quando na verdade é devida à diferença entre a força centrífuga e a devida à superelevação; é mais apropriada a denominação "taxa de variação da aceleração transversal".

$$C = \frac{a_T}{t}$$

Como o tempo (t) que o veículo leva para percorrer o comprimento (mínimo) de transição, à velocidade v, pode ser calculado por:

$$t = \frac{L_{\min}}{v}$$

pode-se obter, por substituição nas expressões anteriores:

$$C = \frac{a_T}{\frac{L_{\min}}{v}} = \left( \frac{v^2}{R} - g \cdot e_R \right) \cdot \frac{v}{L_{\min}}$$

ou, explicitando-se a equação para o comprimento mínimo de transição:

$$L_{\min} = \frac{v^3}{C \cdot R} - \frac{g \cdot e_R \cdot v}{C}$$

Convertendo-se a equação acima para expressar a velocidade em km/h e introduzindo-se o valor correspondente à aceleração normal da gravidade ( $g=9,8 \text{ m/s}^2$ ), chega -se finalmente a:

$$L_{\min} = \frac{V^3}{46,656 \cdot C \cdot R} - \frac{e_R \cdot V}{0,367 \cdot C} \quad [6.8]$$

onde:

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

V : velocidade diretriz (km/h);

R : raio da curva circular (m);

$e_R$  : superelevação da curva circular (m/m);

C : taxa (máxima admissível) de variação da aceleração transversal ( $\text{m/s}^3$ ).

O valor máximo admissível para a taxa de variação da aceleração transversal (C), para atendimento a condições adequadas de conforto e de segurança, é estabelecido empiricamente pelo DNER, sendo dado pela fórmula (DNER, 1999, p. 106):

$$C = 1,5 - 0,009 \cdot V \quad [6.9]$$

onde:

C : taxa máxima admissível de variação da aceleração transversal ( $\text{m/s}^3$ );

V : velocidade diretriz (km/h).

#### 6.6.1.4 Critério da máxima rampa de superelevação

Este critério se baseia no controle da elevação dos bordos da pista de rolamento em relação ao eixo de rotação da pista, que ocorre quando se efetua a distribuição da superelevação, visando assegurar valores razoáveis, do ponto de vista de conforto e de segurança, para a velocidade de giro (transversal) dos veículos, ao percorrer os trechos em transição.

São fixados, em função disso, valores limites para a *rampa de superelevação*, que é a diferença de inclinação longitudinal entre o perfil do eixo da pista e o perfil do bordo da pista mais afetado pela superelevação.

O DNER estabelece valores máximos admissíveis para as rampas de superelevação, considerando o caso básico de pista simples, com duas faixas de trânsito e desenvolvimento da superelevação mediante giro da seção transversal em torno do eixo.



Os valores estabelecidos para o caso básico referem-se, portanto, às elevações do bordo da pista em relação ao eixo de rotação da seção transversal, devido ao giro de uma largura referente a uma faixa de trânsito, e estão relacionados, para diferentes velocidades diretrizes, na tabela 6.2.

TABELA 6.2 – RAMPAS DE SUPERELEVAÇÃO ADMISSÍVEIS : CASO BÁSICO

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

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

Nos casos de desenvolvimento da superelevação que envolvam o giro simultâneo de mais de uma faixa em torno de um eixo de rotação coincidente com um dos bordos da pista, as elevações do outro bordo da pista, em relação ao eixo de rotação se darão em ritmo mais acentuado, diretamente proporcional ao número de faixas que giram em conjunto.

Se fossem mantidos, nesses casos, os mesmos limites para as rampas de superelevação que correspondem ao caso básico envolvendo apenas uma faixa de giro, os comprimentos mínimos de transição ficariam proporcionalmente maiores, podendo resultar em comprimentos de transição muito grandes, eventualmente impraticáveis. Por isso, os valores máximos admissíveis de rampa de superelevação são majorados para os casos em que o giro da seção transversal envolva mais de uma faixa, quando do desenvolvimento da superelevação.

Essa majoração corresponde à aplicação de um fator multiplicador sobre os valores de rampas de superelevação admissíveis correspondentes ao caso básico (de giro de uma faixa); isso equivale à aplicação de um fator multiplicador sobre o comprimento mínimo de transição correspondente ao caso básico.

Na tabela 6.3 estão relacionados os fatores multiplicadores acima considerados, para aplicação aos casos envolvendo mais de uma faixa de giro.

TABELA 6.3 – FATORES MULTIPLICADORES PARA  $L_{\text{mín}}$

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

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

Fixada a rampa de superelevação máxima ( $r_{\text{máx}}$ ) aplicável, calcula-se o comprimento de transição mínimo que corresponde a essa rampa, conhecendo-se a superelevação ( $e_R$ ), o número de faixas de giro no desenvolvimento da superelevação, e a largura normal de faixa ( $L_F$ ).

A partir do esquema ilustrado na figura 6.14, pode-se deduzir a fórmula de cálculo do comprimento mínimo de transição, observando-se que:

$$\Delta h = L_{\text{bás}} \cdot r_{\text{máx}} = L_F \cdot e_R$$

resultando, para o caso básico de giro de 1 faixa:

$$L_{\text{bás}} = L_F \cdot \frac{e_R}{r_{\text{máx}}}$$

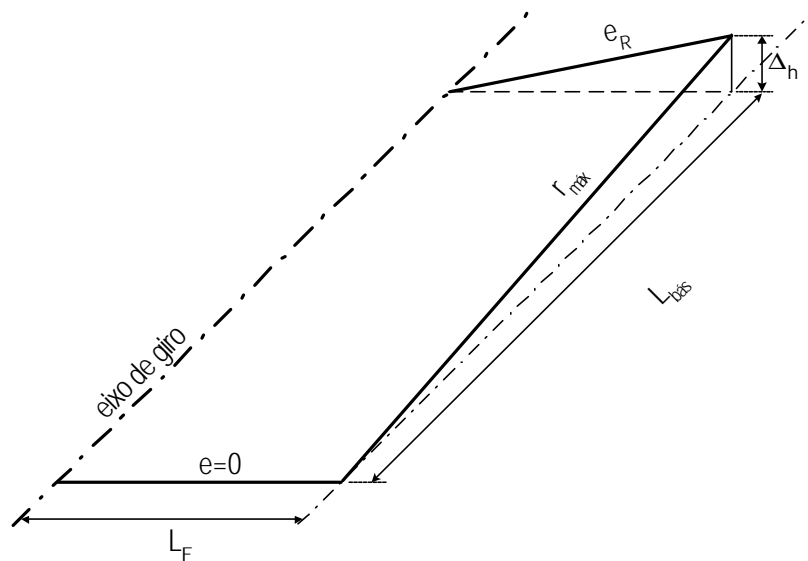
e, portanto, para o caso geral:

$$L_{\min} = F_m \cdot L_F \cdot \frac{e_R}{r_{\max}} \quad [6.10]$$

onde:

- $L_{\min}$  : comprimento mínimo de transição (m);  
 $F_m$  : fator multiplicador em função da largura de rotação da pista (tabela 6.2);  
 $L_F$  : largura da faixa de trânsito (m);  
 $e_R$  : superelevação na curva circular (m/m);  
 $r_{\max}$  : rampa de superelevação máxima admissível (tab. 6.1).

FIGURA 6.14 – RAMPA DE SUPERELEVAÇÃO



### 6.6.2 Comprimento máximo de transição

Assim como há limites para o menor comprimento admissível de transição, há também limites superiores que balizam a definição dos comprimentos de transição no projeto das concordâncias horizontais.

#### 6.6.2.1 Critério do máximo ângulo central da Clotóide

Este critério considera que será utilizada a Clotóide como curva de transição.

Para evitar comprimentos muito grandes da Clotóide em relação ao raio de curvatura em sua extremidade (o que resultaria, aliás, em deflexões relativamente grandes da espiral), o DNER limita o comprimento da Clotóide ao valor do raio da curva circular utilizada na concordância, ou seja:

$$L_{\max} = R \quad [6.11]$$

onde:

- $L_{\max}$  : comprimento máximo de transição (m);  
 $R$  : raio da curva circular (m).

#### 6.6.2.2 Critério do tempo de percurso

Por este critério, o DNER estipula que o comprimento de transição seja limitado à distância percorrida por um veículo, durante um tempo  $t = 8$  segundos, na velocidade diretriz.

Sendo  $v$  a velocidade do veículo (em m/s), o comprimento máximo de transição correspondente ao tempo  $t$  (em s) será:

$$L_{\text{máx}} = v \cdot t$$

expressando a velocidade em km/h e considerando o tempo de 8 s, o comprimento resultará:

$$L_{\text{máx}} = \frac{V}{3,6} \cdot 8$$

ou:

$$L_{\text{máx}} = 2,2 \cdot V \quad [6.12]$$

onde:

$L_{\text{máx}}$  : comprimento máximo de transição (m);  
 $V$  : velocidade diretriz (km/h).

### 6.6.3 Critérios complementares

Além de situar o comprimento da transição entre os limites mínimos e máximos especificados anteriormente, as normas do DNER fazem ainda recomendações adicionais, de ordem prática, a serem observadas para a fixação dos comprimentos de transição a utilizar nas concordâncias horizontais, conforme se descreve a seguir.

#### 6.6.3.1 Critério de arredondamento

O valor a ser definido para o comprimento de transição, observados os limites tratados nos itens anteriores, deverá ser preferencialmente arredondado para múltiplo de 10,00 m, para fins de facilidade de cálculo (ao menos nos cálculos manuais) e de posterior locação das curvas de transição no campo.

Em algumas circunstâncias, onde se requeira a coincidência das extremidades de espirais de duas concordâncias sucessivas, ou onde não seja possível o emprego de valores arredondados, poder-se-á utilizar valores fracionários.

#### 6.6.3.2 Critério da extensão mínima com superelevação total

Para que os trechos em curva resultem em condições julgadas satisfatórias sob o ponto de vista da aparência geral e da condução ótica, o DNER recomenda que as concordâncias horizontais com curvas de transição sejam projetadas de forma a que os comprimentos das curvas circulares resultem iguais ou superiores à distância percorrida no tempo de 2 segundos, na velocidade diretriz (DNER, 1999, p. 112).

Sendo  $v$  a velocidade diretriz (em m/s), o comprimento correspondente à distância percorrida no tempo  $t = 2$  s será calculado por:

$$D_c = v \cdot t = v \cdot 2$$

Ou, expressando a velocidade em km/h:

$$D_{\text{Cmin}} = \frac{V}{3,6} \cdot 2$$

resultando, então:

$$D_{\text{Cmin}} = 0,56 \cdot V \quad [6.13]$$

onde:

$D_{Cmin}$  : comprimento (desenvolvimento) mínimo da curva circular (m);  
 $V$  : velocidade diretriz (km/h).

### 6.6.3.3 Critério de aparência geral

Visando à obtenção de uma aparência geral satisfatória, o DNER recomenda que as curvas sucessivas, tanto no caso de curvas reversas como no caso de curvas de mesmo sentido<sup>42</sup>, sejam projetadas de forma a que os comprimentos de transição obedeam à seguinte relação:

$$\frac{R_1 \cdot L_1}{R_2 \cdot L_2} \leq 2,5 \quad [6.14]$$

sendo:

$$R_1 \cdot L_1 \geq R_2 \cdot L_2$$

onde:

$R_1, R_2$  : raios das curvas circulares sucessivas (m);  
 $L_1, L_2$  : comprimentos de transição para as respectivas curvas (m).

### 6.6.3.4 Critérios para concordâncias com curvas compostas

Quando o projeto de uma concordância é feito com o uso de curva composta, envolvendo duas curvas circulares de raios diferentes, o comprimento de transição da superelevação entre essas curvas é determinado considerando os mesmos critérios aplicáveis para curvas isoladas (incluindo o comprimento mínimo absoluto), observando as seguintes peculiaridades:

- na consideração do critério da máxima rampa de superelevação admissível (fórmula [6.10]), considera-se para a superelevação  $e_R$  o valor correspondente à diferença entre as superelevações adotadas para as curvas envolvidas;
- na consideração do critério do conforto (fórmula [6.8]), considera-se para a superelevação  $e_R$  o mesmo valor da diferença acima, e para o raio  $R$  o valor do raio equivalente dado por:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}$$

onde:

$R_{eq}$  : raio de curva equivalente (m);  
 $R_1$  : raio da curva de menor raio (m);  
 $R_2$  : raio da curva de maior raio (m).

**EXEMPLO 6.4** : Caso o projeto de eixo imaginado no exemplo 4.1 fosse desenvolvido em região de relevo ondulado, na Classe II do DNER (para projetos de rodovias novas), utilizando, para as concordâncias horizontais no  $PI_1$  e no  $PI_2$ , os raios de curva tabelados  $R_1 = 214,88$  m e  $R_2 = 245,57$  m, respectivamente, ambas as concordâncias seriam efetuadas com curvas de transição (vide tabela 6.1).

Os comprimentos das curvas de transição deveriam obedecer aos seguintes limites, de acordo com os critérios vistos:

<sup>42</sup> Principalmente no caso de curvas próximas o bastante para que o desenvolvimento das superelevações entre as curvas adjacentes resultem em interferências mútuas – (i) no caso de curvas sucessivas de sentidos contrários, quando não houver distância suficiente para se chegar à situação de tangente intermediária com abaulamento normal, e (ii) no caso de curvas sucessivas de mesmo sentido, quando a extensão da tangente intermediária com abaulamento normal for inferior à distância percorrida por um veículo, na velocidade diretriz, no tempo de 2 segundos.

a) limites mínimos ( $L_{\min}$ ):

a.1) critério do comprimento mínimo absoluto:

$$L_{\min} = 0,56 \cdot V \text{ (fórmula [6.5]);}$$

como  $V = 70 \text{ km/h}$  (vide tabela 2.3), resulta:

$$L_{\min} = 0,56 \cdot 70 = 39,20 \text{ m;}$$

sujeito ao mínimo admissível

$$L_{\min} = 30,00 \text{ m;}$$

a.2) critério da fluência ótica: não é aplicável a este exemplo, pois  $R_{1,2} < 800 \text{ m}$ ;

a.3) critério do conforto: a taxa máxima admissível de variação da aceleração transversal (fórmula [6.9]), seria:

$$C = 1,5 - 0,009 \cdot V = 1,5 - 0,009 \cdot 70 = 0,87 \text{ m/s}^3;$$

a superelevação  $e_R$  a ser considerada para a curva circular de raio  $R_1 = 214,88 \text{ m}$  nas condições de projeto admitidas, seria de 7,700 % (vide determinação desse valor no exemplo 5.1); para a curva circular de raio  $R_2 = 245,57 \text{ m}$ , a superelevação a considerar seria de 7,200 % (esse valor pode ser obtido diretamente na tabela 5.5 ou calculado com auxílio da fórmula [5.4]; o leitor é convidado a fazer esse cálculo); os comprimentos mínimos de transição para os dois raios considerados seriam, de acordo com a fórmula [6.8]:

$$L_{\min(1)} = \frac{70^3}{46,656 \cdot 0,87 \cdot 214,88} - \frac{0,077 \cdot 70}{0,367 \cdot 0,87} = 22,44 \text{ m;}$$

$$L_{\min(2)} = \frac{70^3}{46,656 \cdot 0,87 \cdot 245,57} - \frac{0,072 \cdot 70}{0,367 \cdot 0,87} = 18,63 \text{ m;}$$

a.4) critério da máxima rampa de superelevação: considerando o caso básico, ter-se-ia:

$$F_m = 1,0 \text{ (tabela 6.3);}$$

$$r_{\max} = 1:185 \text{ (tabela 6.2);}$$

$$L_F = 3,50 \text{ m (tabela 2.3);}$$

resultando, portanto, de acordo com a fórmula [6.10], para os raios considerados:

$$L_{\min(1)} = 1,0 \cdot 3,50 \cdot \frac{0,077}{1/185} = 49,86 \text{ m;}$$

$$L_{\min(2)} = 1,0 \cdot 3,50 \cdot \frac{0,072}{1/185} = 46,62 \text{ m;}$$

b) limites máximos ( $L_{\max}$ ):

b.1) critério do máximo ângulo central da Clotóide (fórmula [6.11]):

$$L_{\max(1)} = R_1 = 214,88 \text{ m;}$$

$$L_{\max(2)} = R_2 = 245,57 \text{ m;}$$

b.2) critério do tempo de percurso (fórmula [6.12]):

$$L_{\max} = 2,2 \cdot V = 2,2 \cdot 70 = 154,00 \text{ m;}$$

assim, observados esses limites, e o critério complementar de adotar para  $L_C$  valores múltiplos de 10,00 m, os comprimentos de transição, para ambos os raios considerados, deveriam ficar limitados a:

$$50,00 \text{ m} \leq L_C \leq 150,00 \text{ m.}$$

## 6.7 CÁLCULO DA TRANSIÇÃO COM A ESPIRAL

Dadas duas tangentes que se interceptam num PI, com certo ângulo de deflexão ( $I$ ), e uma curva circular com dado raio  $R$ , a concordância horizontal com curva de transição, envolvendo a inserção de dois ramos de espiral, tal como representado na figura 6.6, fica definida geometricamente a partir da fixação do comprimento  $L_c$  da curva de transição (espiral) a ser utilizada.

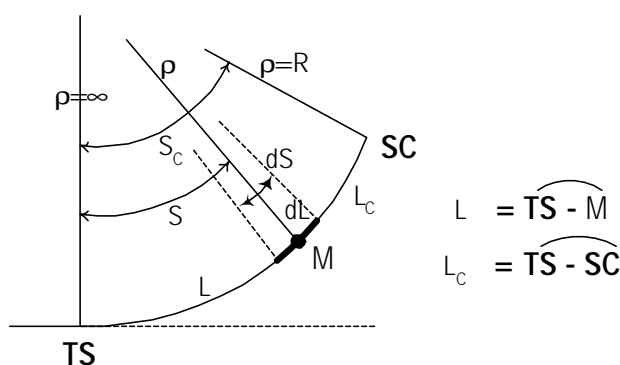
As fórmulas para os cálculos analíticos pertinentes são deduzidas a seguir, usando o roteiro e notação da *American Railway Engineering Association* (in CARVALHO, 1966).

### 6.7.1 Ângulo central da espiral

Tomando a perpendicular à tangente na origem da espiral (onde o raio é infinito) como origem para a contagem de arcos e de ângulos centrais da espiral, pode-se definir, tal como representado na figura 6.15, no entorno de um ponto  $M$  qualquer da espiral, onde o raio de curvatura é  $\rho$ , compreendendo um arco de comprimento  $L$  e um ângulo central  $S$ , um arco elementar  $dL$ , ao qual corresponde uma porção elementar  $dS$  do ângulo central, tal que:

$$dS = \frac{dL}{\rho}$$

FIGURA 6.15 – ÂNGULOS E ARCOS DA ESPIRAL



Lembrando que, na espiral (fórmula [6.2]):

$$\rho \cdot L = R \cdot L_c = A^2$$

pode-se desenvolver:

$$\rho = \frac{R \cdot L_c}{L}$$

obtendo-se, por substituição:

$$dS = \frac{L}{R \cdot L_c} \cdot dL$$

Integrando esta expressão ao longo do arco, entre a origem da espiral e o ponto  $M$ , tem-se:

$$S = \int_0^L \frac{L}{R \cdot L_c} \cdot dL = \frac{1}{R \cdot L_c} \int_0^L L \cdot dL = \frac{1}{R \cdot L_c} \cdot \left[ \frac{L^2}{2} \right]_0^L$$

ou:

$$S = \frac{L^2}{2 \cdot R \cdot L_c}$$

[6.15]

e, no ponto osculador – na extremidade da espiral – onde  $L = L_c$  e  $S = S_c$ , tem-se então:

$$S_c = \frac{L_c}{2 \cdot R} \quad [6.16]$$

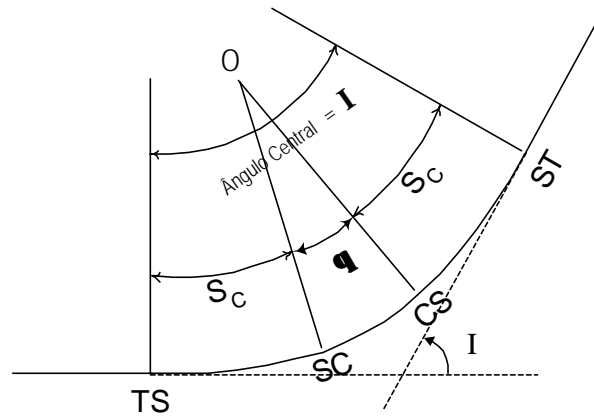
onde:

$S_c$  : ângulo central da espiral (radianos);  
 $L_c$  : comprimento da espiral (m);  
 $R$  : raio da curva circular (m).

### 6.7.2 Ângulo central da curva circular

Observando-se o esquema da concordância com curva de transição, reproduzido de forma simplificada na figura 6.16, conclui-se que o ângulo central total da concordância é numericamente igual ao ângulo de deflexão, pois as retas que limitam esses ângulos são perpendiculares entre si.

FIGURA 6.16 – ÂNGULOS CENTRAIS DA CONCORDÂNCIA



Tem-se então que:

$$I = 2 \cdot S_c + \theta$$

ou:

$$\theta = I - 2 \cdot S_c \quad [6.17]$$

onde:

$\theta$  : ângulo central da curva circular;  
 $I$  : deflexão no PI;  
 $S_c$  : ângulo central da espiral.

### 6.7.3 Desenvolvimento em curva circular

Conhecido o ângulo central da curva circular e o seu raio de curvatura, pode-se determinar o valor do comprimento do trecho em curva circular, também denominado por *desenvolvimento em curva circular*, por meio da fórmula:

$$D_c = \theta \cdot R \quad [6.18]$$

onde:

$D_c$  : desenvolvimento em curva circular (m);  
 $\theta$  : ângulo central da curva circular (em radianos);  
 $R$  : raio da curva circular (m).

### 6.7.4 Coordenadas cartesianas da espiral

A espiral de transição, como ilustrado na figura 6.2, pode ser referida a um sistema de eixos cartesianos, com origem coincidente com a origem da espiral (onde o raio de curva é infinito), e eixo das ordenadas coincidente com a direção da tangente à espiral nesse ponto.

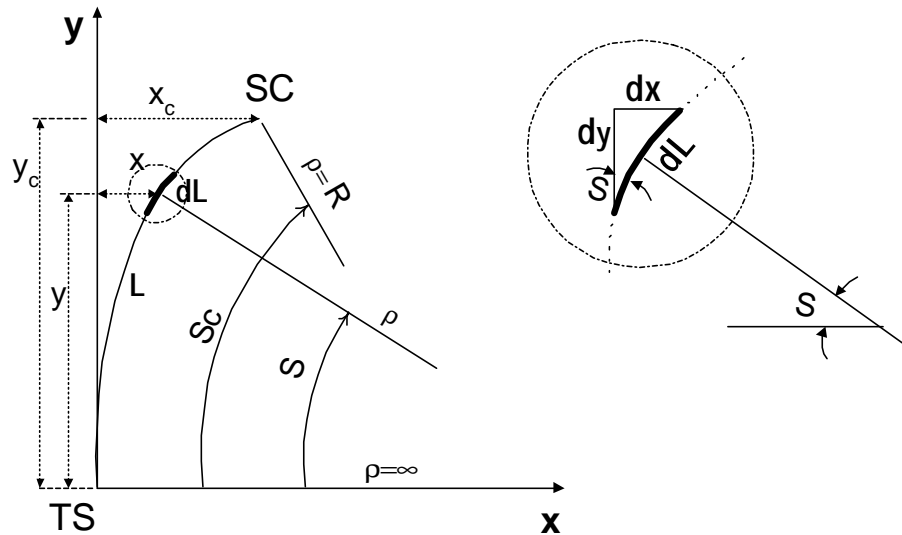
As posições dos pontos da espiral de transição, numa concordância, podem ser então caracterizados por coordenadas cartesianas ( $x$  e  $y$ ), sendo as ordenadas medidas ao longo da tangente, a partir do TS (ou do ST), e as abscissas medidas perpendicularmente à tangente, como se indica na figura 6.17.

Tomando um ponto qualquer da espiral, com coordenadas  $x$  e  $y$ , e imaginando um arco elementar de comprimento  $dL$  no entorno desse ponto, tal como representado na figura 6.17, pode-se definir, a partir do triângulo elementar destacado no círculo, as seguintes relações trigonométricas:

$$dy = dL \cdot \cos(S)$$

$$dx = dL \cdot \sin(S)$$

FIGURA 6.17 – COORDENADAS CARTESIANAS DA ESPIRAL



Lembrando que  $S$  pode ser expresso em função de  $L$  (fórmula [6.15]), pode-se obter as expressões para as coordenadas  $x$  e  $y$  por meio das integrais definidas:

$$x = \int_0^L \sin\left(\frac{L^2}{2 \cdot R \cdot L_C}\right) \cdot dL$$

$$y = \int_0^L \cos\left(\frac{L^2}{2 \cdot R \cdot L_C}\right) \cdot dL$$

calculando as integrais e desenvolvendo as expressões resultantes em série, tem-se:

$$x = \frac{L^3}{6 \cdot R \cdot L_C} - \frac{L^7}{336 \cdot R^3 \cdot L_C^3} + \frac{L^{11}}{42.240 \cdot R^5 \cdot L_C^5} - \frac{L^{15}}{9.676.800 \cdot R^7 \cdot L_C^7} + \dots$$

$$y = L - \frac{L^5}{40 \cdot R^2 \cdot L_C^2} + \frac{L^9}{3.456 \cdot R^4 \cdot L_C^4} - \frac{L^{13}}{599.040 \cdot R^6 \cdot L_C^6} + \dots$$





Na figura 6.18 está representada esquematicamente uma concordância inicial imaginária com curva circular simples que foi convertida em concordância com transição, mediante o recuo da curva circular e a inserção de dois ramos de espiral.

Tudo se passa como se o PC da concordância original (imaginária) com curva circular simples (ponto C na figura 6.18) fosse recuado para a posição PC' ( ponto G na figura 6.18).

Em relação ao mesmo sistema de eixos cartesianos que referencia as coordenadas (x,y) da espiral de transição, pode-se definir as coordenadas (p,q) do PC recuado (PC').

Assim, a abcissa p mede o afastamento da curva circular em relação à tangente.

Como a concordância é simétrica, no caso, o mesmo ocorre com o PT, que é recuado para a posição PT', afastando-se da tangente de um valor medido pela abcissa p.

A coordenada q corresponde à ordenada do ponto recuado (PC' ou PT'), medida sobre a tangente, a partir da origem da espiral (TS ou ST).

Ao afastamento (p) da curva circular, em relação às tangentes, corresponde um recuo da curva circular, em relação à sua posição inicial imaginária, designado pela letra t.

Da figura 6.18 pode-se inferir diretamente as seguintes relações geométricas simples:

- abcissa (p) do PC recuado ou do PT recuado:

$$p = \overline{BG} = \overline{BF} - \overline{FG} = \overline{BF} - (\overline{O'G} - \overline{O'F}) = \overline{BF} - [\overline{O'G} - \overline{O'E} \cdot \cos(S_C)]$$

ou:

$$p = x_C - R \cdot [1 - \cos(S_C)] \quad [6.23]$$

onde:

p : afastamento da curva circular, ou abcissa do PC' ou do PT' (m);

$x_C$  : abcissa da extremidade da espiral (m);

R : raio da curva circular (m);

$S_C$  : ângulo central da espiral (radianos);

- ordenada (q) do PC recuado ou do PT recuado:

$$q = \overline{AB} = \overline{AD} - \overline{BD} = \overline{AD} - \overline{FE} = \overline{AD} - \overline{O'E} \cdot \sin(S_C)$$

ou:

$$q = y_C - R \cdot \sin(S_C) \quad [6.24]$$

onde:

q : ordenada do PC' ou do PT' (m);

$y_C$  : ordenada da extremidade da espiral (m);

R : raio da curva circular (m);

$S_C$  : ângulo central da espiral (radianos);

- recuo (t) da curva circular:

$$t = \overline{HY} = \overline{CG} = \frac{\overline{GB}}{\cos(I/2)}$$

ou:

$$t = \frac{p}{\cos(I/2)} \quad [6.25]$$

onde:

p : afastamento da curva circular, ou abcissa do PC' ou do PT' (m);

I : deflexão no PI.

### 6.7.6 Tangente exterior

Da observação da figura 6.18, pode-se deduzir a fórmula para o cálculo da tangente exterior ( $T_s$ ), por meio das seguintes relações geométricas imediatas:

$$T_s = \overline{(TS)(PI)} = \overline{A(PI)} = \overline{AB} + \overline{B(PI)} = \overline{AB} + \overline{O'B} \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{I}{2}\right)$$

$$T_s = \overline{AB} + (\overline{O'G} + \overline{GB}) \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{I}{2}\right)$$

ou, finalmente:

$$T_s = q + (p + R) \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{I}{2}\right) \quad [6.26]$$

onde:

- $T_s$  : tangente exterior (m);
- $q$  : ordenada do PC' ou do PT' (m);
- $p$  : abscissa do PC' ou do PT' (m);
- $R$  : raio da curva circular (m);
- $I$  : deflexão no PI.

**EXEMPLO 6.5** : Projetando-se o eixo de uma rodovia nova, em região de relevo ondulado, na Classe II do DNER, a partir dos alinhamentos representados na figura 4.3, e utilizando-se os raios de curva  $R_1 = 214,88$  m e  $R_2 = 245,57$  m, ambas as concordâncias horizontais deverão ser feitas com curvas de transição (vide tabela 6.1).

Os comprimentos de transição, para ambas as concordâncias, poderão ser definidos no intervalo  $50,00 \text{ m} \leq L_c \leq 150,00 \text{ m}$ , conforme visto no exemplo 6.4.

Escolhendo-se, para os dois casos, o menor valor, isto é,  $L_{c1} = 50,00$  m e  $L_{c2} = 50,00$  m, as concordâncias com espirais de transição poderão ser analiticamente calculadas, de acordo com a seguinte seqüência:

- ângulos centrais das espirais (fórmula [6.16]):

$$S_{c1} = \frac{50,00}{2 \cdot 214,88} = 0,116.344 \text{rd} = 6^\circ 39' 58''$$

$$S_{c2} = \frac{50,00}{2 \cdot 245,57} = 0,101.804 \text{rd} = 5^\circ 49' 59''$$

- ângulos centrais das curvas circulares (fórmula [6.17]):

$$\theta_1 = 24^\circ 12' 40'' - 2 \cdot (6^\circ 39' 58'') = 10^\circ 52' 44''$$

$$\theta_2 = 32^\circ 49' 50'' - 2 \cdot (5^\circ 49' 59'') = 21^\circ 09' 52''$$

- desenvolvimentos em curvas circulares (fórmula [6.18]):

$$D_{c1} = (10^\circ 52' 44'') \cdot \left(\frac{\pi}{180^\circ}\right) \cdot 214,88 = 40,80 \text{ m}$$

$$D_{c2} = (21^\circ 09' 52'') \cdot \left(\frac{\pi}{180^\circ}\right) \cdot 245,57 = 90,71 \text{ m}$$

- coordenadas  $x_c$  e  $y_c$  (fórmulas [6.21] e [6.22]):

$$x_{c1} = \frac{50,00 \cdot 0,116.344}{3} \cdot \left(1 - \frac{0,116.344^2}{14} + \frac{0,116.344^4}{440} - \dots\right) = 1,94 \text{m};$$

$$y_{c1} = 50,00 \cdot \left(1 - \frac{0,116.344^2}{10} + \frac{0,116.344^4}{216} - \dots\right) = 49,93 \text{m};$$

$$x_{C2} = \frac{50,00 \cdot 0,101.804}{3} \cdot \left( 1 - \frac{0,101.804^2}{14} + \frac{0,101.804^4}{440} - \dots \right) = 1,70\text{m};$$

$$y_{C1} = 50,00 \cdot \left( 1 - \frac{0,101.804^2}{10} + \frac{0,101.804^4}{216} - \dots \right) = 49,95\text{m};$$

- parâmetros p e q (fórmulas [6.23] e [6.24]):

$$p_1 = 1,94 - 214,88 \cdot [1 - \cos(6^\circ 39' 58'')] = 0,49 \text{ m};$$

$$q_1 = 49,93 - 214,88 \cdot \sin(6^\circ 39' 58'') = 24,99 \text{ m};$$

$$p_2 = 1,70 - 245,57 \cdot [1 - \cos(5^\circ 49' 59'')] = 0,43 \text{ m};$$

$$q_2 = 49,95 - 245,57 \cdot \sin(5^\circ 49' 59'') = 24,99 \text{ m};$$

- tangentes exteriores (fórmula [6.26]):

$$T_{S1} = 24,99 + (0,49 + 214,88) \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{24^\circ 12' 40''}{2}\right) = 71,18\text{m};$$

$$T_{S2} = 24,99 + (0,43 + 245,57) \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{32^\circ 49' 50''}{2}\right) = 97,46\text{m};$$

- estaqueamento dos pontos singulares:

$$TS_1 = 0 = \overline{PP - PI_1} - T_{S1} = 133,97\text{m} - 71,18\text{m} = 62,79\text{m} \equiv 3 + 2,79\text{m};$$

$$SC_1 = TS_1 + L_{C1} = 3 + 2,79 \text{ m} + 50,00 \text{ m} \equiv 5 + 12,79 \text{ m};$$

$$CS_1 = SC_1 + D_{C1} = 5 + 12,79 \text{ m} + 40,80 \text{ m} \equiv 7 + 13,59 \text{ m};$$

$$ST_1 = CS_1 + L_{C1} = 7 + 13,59 \text{ m} + 50,00 \text{ m} \equiv 10 + 3,59 \text{ m};$$

$$TS_2 = ST_1 + (\overline{PI_1 - PI_2} - T_{S1} - T_{S2}) = \\ 10 + 3,59\text{m} + (199,49\text{m} - 71,18\text{m} - 97,46\text{m}) \equiv 11 + 14,44\text{m};$$

$$SC_2 = TS_2 + L_{C2} = 11 + 14,44 \text{ m} + 50,00 \text{ m} \equiv 14 + 4,44 \text{ m};$$

$$CS_2 = SC_2 + D_{C2} = 14 + 4,44 \text{ m} + 90,71 \text{ m} \equiv 18 + 15,15 \text{ m};$$

$$ST_2 = CS_2 + L_{C2} = 18 + 15,15 \text{ m} + 50,00 \text{ m} \equiv 21 + 5,15 \text{ m};$$

$$PF = ST_2 + (\overline{PI_2 - PF} - T_{S2}) = 21 + 5,15\text{m} + (151,12\text{m} - 97,46\text{m}) \equiv 23 + 18,81\text{m}.$$

Compare os resultados encontrados com os valores referidos no exemplo 6.1.

Observe que o desenvolvimento em curva circular da 1ª concordância ( $D_{C1} = 40,80 \text{ m}$ ) resultou maior que a distância percorrida, à velocidade diretriz, durante o tempo de 2 s, ou seja (vide fórmula [6.13]):

$$D_{C1} > D_{\text{cmin}} = 0,56 \cdot 70 = 39,20 \text{ m}$$

(seria possível utilizar, na concordância horizontal do  $PI_1$ , uma curva de transição com comprimento  $L_{C1} = 60,00 \text{ m}$ ? Por que?).

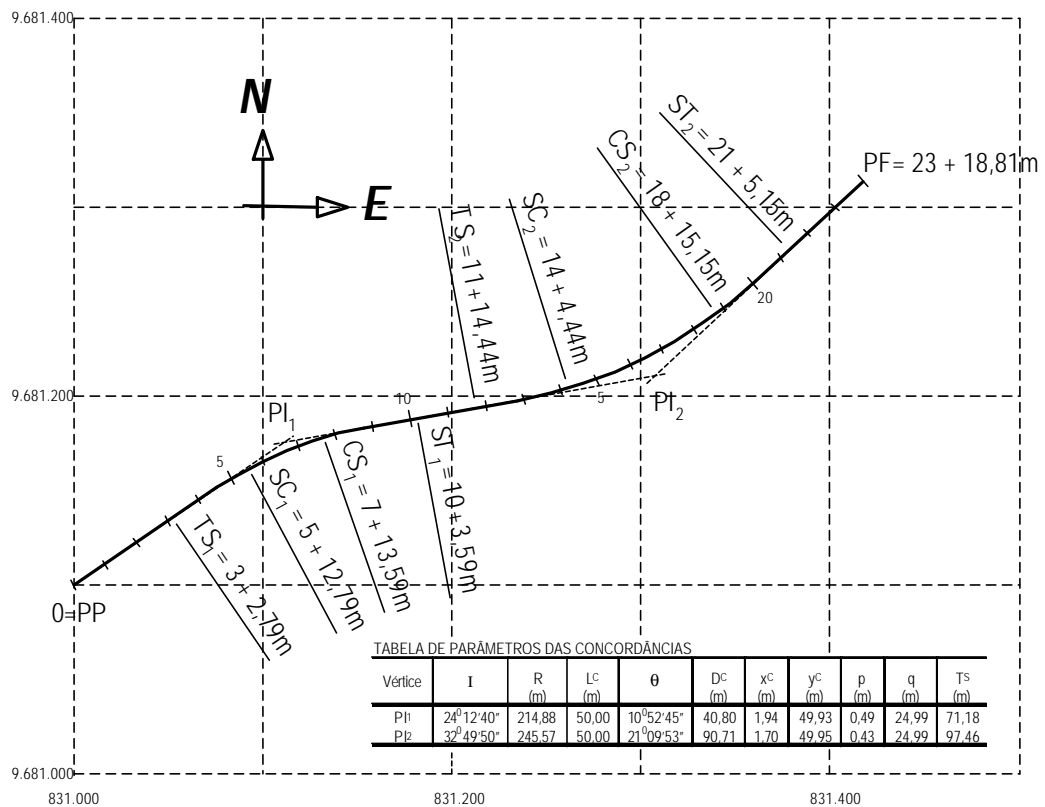
Uma vez calculadas analiticamente as concordâncias com espirais de transição, a representação gráfica do eixo projetado em escala pode ser feito de forma simples, observando-se os seguintes passos para o desenho de cada concordância horizontal:

- assinalam-se, com auxílio de um escalímetro, as posições do TS e do ST ao longo das tangentes, medindo-se o comprimento da tangente exterior a partir do  $PI$ ; baixam-se, por esses pontos, segmentos de reta perpendiculares às tangentes, para referenciamento das estacas correspondentes a esses pontos singulares;
- marcam-se as posições do SC e do CS por meio das coordenadas  $x_c$  e  $y_c$ ;

- determina-se, com auxílio de um compasso, a posição do centro (O) da curva circular, marcado pela interseção de arcos traçados com centro no SC e no CS, e raio (R) igual ao da curva circular;
- com centro em O, e abertura do compasso igual ao raio R, traça-se o arco de curva circular entre o SC e o CS; baixam-se, por esses pontos, segmentos de reta perpendiculares ao eixo (na direção do centro O), para fins de referenciamento desses pontos singulares;
- com auxílio de régua de curvas (ou "curva francesa"), traçam-se as espirais entre TS e SC e entre CS e ST, tendo como referências os pontos correspondentes às origens e às extremidades das curvas, e as direções das tangentes às curvas nesses pontos.

Na figura 6.19 está representado graficamente o eixo projetado conforme o exemplo 6.5, calculado com as curvas de transição escolhidas, desenhado de acordo com as convenções básicas recomendadas pelo Manual de serviços de consultoria para estudos e projetos rodoviários (DNER, 1978, v.2).

FIGURA 6.19 – DESENHO DO EIXO PROJETADO COM CURVAS DE TRANSIÇÃO



O desenho do eixo projetado resulta um tanto impreciso devido ao processo de aproximação gráfica e às escalas convencionalmente utilizadas, mas isto não afeta o projeto da rodovia propriamente dito, pois essa forma de representação gráfica das concordâncias, incluindo as espirais de transição, visa apenas a permitir a visualização do eixo projetado numa planta plani-altimétrica, em escala conveniente.

## 6.8 LOCAÇÃO DA ESPIRAL DE TRANSIÇÃO

A marcação das espirais de transição no campo, a exemplo do que já foi visto para o caso das concordâncias com curvas circulares simples, deve ser feita com recursos (e precisão) topográficos, por meio de medidas de ângulos e comprimentos.

Há diferentes formas de se marcar pontos de uma espiral de transição no terreno, sendo as mais comuns a marcação de pontos por coordenadas cartesianas, e a marcação de pontos por meio de medidas de deflexões e comprimentos.

A marcação de uma espiral por coordenadas cartesianas pode ser feita por meio das coordenadas  $(x,y)$  que podem ser calculadas pelas fórmulas [6.15], [6.19] e [6.20] para diferentes pontos (estacas) ao longo da espiral.

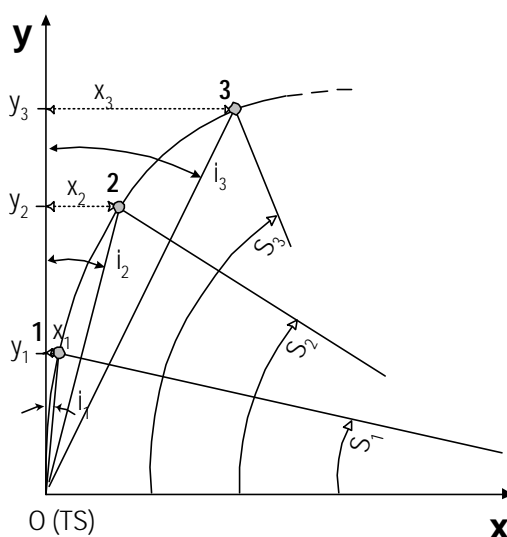
Para a marcação por meio de medidas de deflexões e comprimentos, utiliza-se preferencialmente, no Brasil, o procedimento de locação por deflexões acumuladas, já descrito no item 4.2.2 para o caso de locação de curvas circulares.

### 6.8.1 Locação com o teodolito na origem da espiral

No processo de locação por deflexões acumuladas, como se recorda, a posição de cada ponto da curva é definida pelo alinhamento que corresponde ao ângulo de deflexão em relação à tangente à curva onde está instalado o teodolito, e pela distância, medida ao longo da curva, desde o teodolito até o ponto em questão.

Na figura 6.20 está representada esquematicamente uma espiral de transição, referida, da forma convencional, a um sistema de eixos cartesianos, que tem origem no TS, eixo das ordenadas coincidente com a direção da tangente à espiral na origem (onde o raio é infinito), e eixo das abcissas perpendicular à curva nesse ponto (coincidente com a direção do raio).

FIGURA 6.20 – LOCAÇÃO DE PONTOS DA ESPIRAL



Nessa figura, estão assinaladas as coordenadas cartesianas  $(x_i, y_i)$ , as deflexões acumuladas  $(i_i)$  e os ângulos centrais  $(S_i)$  correspondentes a três pontos (1, 2 e 3) da espiral.

Para a locação, por coordenadas cartesianas, das estacas referentes a esses pontos (bem assim aos pontos subsequentes) assinalados ao longo da espiral, pode-se calcular as coordenadas

$(x_i, y_i)$  que lhes correspondem, por meio das fórmulas já vistas, uma vez que sejam conhecidos os comprimentos dos respectivos arcos ( $L_{01}, L_{02}, L_{03}, \dots$ ) da espiral.

Caso se desejasse efetuar a locação dos pontos pelo método das deflexões acumuladas, os ângulos de deflexão poderiam ser calculados, uma vez conhecidos os valores das coordenadas  $(x_i, y_i)$ , pois para qualquer ponto  $i$  tem-se que:

$$\operatorname{tg}(i_i) = \frac{x_i}{y_i}$$

ou:

$$i_i = \operatorname{arc.tg} \frac{x_i}{y_i}$$

onde:

- $i_i$  : deflexão acumulada correspondente a um ponto  $i$  da espiral;
- $x_i$  : abscissa do ponto  $i$  da espiral (m);
- $y_i$  : ordenada do ponto  $i$  da espiral (m).

**EXEMPLO 6.6** : Admita-se, para fins ilustrativos, que na figura 6.20 esteja representada uma espiral de transição projetada com comprimento  $L_C = 40,00$  m e raio de curva  $R = 61,41$  m na extremidade da espiral; admita-se, também, que os pontos 1, 2 e 3 (bem assim os subsequentes) sejam equidistantes, compreendendo arcos inteiros de 5,00 m ao longo da curva, a partir da origem.

Com auxílio das fórmulas [6.15], [6.19] e [6.20] pode-se calcular os ângulos centrais da espiral ( $S_i$ ), as coordenadas  $(x_i, y_i)$  e os respectivos ângulos de deflexão acumulados, correspondentes a esses pontos equidistantes.

Na tabela 6.4 estão discriminados os resultados encontrados para o caso ilustrado (verifique ao menos alguns desses cálculos!).

Conhecidos esses ângulos de deflexão, a locação dos pontos poderá ser efetuada seqüencialmente, lembrando que as medidas dos arcos são substituídas pelas medidas das cordas ao longo da curva<sup>43</sup>.

TABELA 6.4 – VALORES PARA LOCAÇÃO DA ESPIRAL

PONTOS	ARCO ACUMULADO (m)	S (radianos)	COORDENADAS		DEFLEXÕES ACUMULADAS $i$
			x (m)	y (m)	
1	5,00	0,005.089	0,01	5,00	0°05'50"
2	10,00	0,020.355	0,07	10,00	0°23'20"
3	15,00	0,045.799	0,23	15,00	0°52'29"
4	20,00	0,081.420	0,54	19,99	1°33'18"
5	25,00	0,127.219	1,06	24,96	2°25'46"
6	30,00	0,183.195	1,83	29,90	3°29'52"
7	35,00	0,249.349	2,90	34,78	4°45'35"
8 (SC ou CS)	40,00	0,325.680	4,31	39,58	6°12'52"

## 6.8.2 Locação com mudanças do teodolito

A locação da espiral pelo método das deflexões acumuladas, com os valores da tabela 6.4, pressupõe que todos os pontos serão locados com o teodolito estacionado na origem (no TS ou no

<sup>43</sup> Para a locação das espirais, considera-se o mesmo critério de fixação do tamanho máximo da corda em função do raio de curva estabelecido para o caso das curvas circulares, adotando-se o raio de curva na extremidade da espiral como parâmetro de referência; no caso do exemplo, para o raio  $R=61,41$ m, a corda máxima admitida é de 5,00m.

ST), sendo os comprimentos dos arcos (substituídos pelas cordas) marcados sucessivamente ao longo da curva.

Na hipótese de não haver condições de visibilidade para a locação de todos os pontos com o teodolito estacionado na origem, a locação poderá ser continuada a partir de qualquer ponto já locado da espiral, bastando a instalação do teodolito nesse ponto e a determinação da direção da tangente à espiral nesse ponto, que será a direção de referência para as novas deflexões.

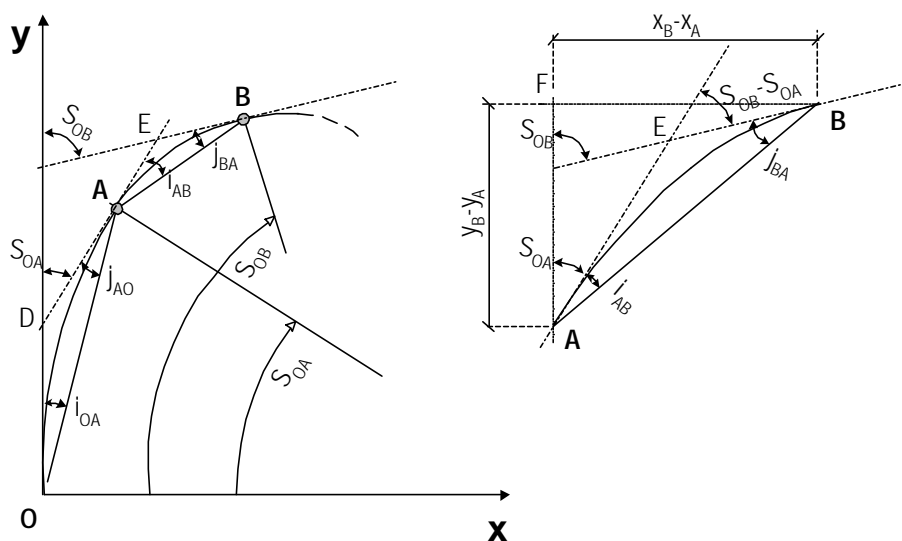
O procedimento para a locação da espiral com a mudança do teodolito é essencialmente o mesmo já descrito para o caso da locação da curva circular simples, modificando-se, evidentemente, as fórmulas para o cálculo dos ângulos de deflexões (de vante e de ré), já que a espiral tem curvaturas diferentes em cada ponto.

Na figura 6.21 está representada uma espiral referenciada ao sistema de eixos cartesianos convencional, estando nela assinalados dois pontos quaisquer (A e B), as tangentes à espiral nesses pontos, e os ângulos centrais da espiral ( $S_{OA}$  e  $S_{OB}$ ), correspondentes aos arcos compreendidos entre a origem e os respectivos pontos.

Estão também assinalados, na mesma figura, os ângulos de deflexão de interesse, representando-se com a letra *i* as deflexões de vante (isto é, as deflexões tomadas no sentido da origem em direção à extremidade da espiral) e com a letra *j* as deflexões de ré (tomadas no sentido contrário).

Observa-se, no detalhe da figura, as principais relações entre as deflexões, os ângulos centrais das espirais e as coordenadas (x,y) correspondentes aos pontos assinalados.

FIGURA 6.21 – DEFLEXÕES NUM PONTO QUALQUER DA ESPIRAL



O ângulo  $i_{OA}$ , que mede a deflexão do ponto A com o teodolito estacionado na origem, pode ser calculado, como já visto, pela relação:

$$i_{OA} = \text{arc.tg} \left( \frac{x_A}{y_A} \right) \quad [6.27]$$

Imaginando-se que o teodolito seja instalado no ponto A, a direção da tangente à curva nesse ponto poderá ser determinada se for conhecido o ângulo de ré  $j_{AO}$ .

Do exame do triângulo OAD, infere-se que:

$$j_{AO} = S_{OA} - i_{OA} \quad [6.28]$$



Instalado o teodolito no ponto A e tomando-se a direção da tangente à espiral nesse ponto como referência para a contagem de ângulos, a deflexão  $i_{AB}$ , necessária à locação do ponto B, poderá ser calculada a partir do triângulo retângulo AFB representado no detalhe da figura 6.21, obtendo-se:

$$\operatorname{tg}(i_{AB} + S_{OA}) = \frac{x_B - x_A}{y_B - y_A}$$

ou:

$$i_{AB} = \operatorname{arc.tg}\left(\frac{x_B - x_A}{y_B - y_A}\right) - S_{OA} \quad [6.29]$$

Caso se procedesse a nova mudança do teodolito, instalando-o no ponto B, a direção da tangente à espiral nesse ponto poderia ser determinada conhecendo-se o valor do ângulo de deflexão  $j_{BA}$  (ângulo de ré).

Da observação do triângulo AEB, no detalhe da figura 6.21, pode-se inferir que:

$$j_{BA} = (S_{OB} - S_{OA}) - i_{AB} \quad [6.30]$$

As fórmulas [6.27] a [6.30] permitem o cálculo de todos os ângulos de deflexão que possam interessar na locação de espirais de transição, quaisquer que sejam as hipóteses de mudanças de teodolito consideradas.

**EXEMPLO 6.7 :** Para ilustrar os procedimentos de cálculo descritos, tome-se o caso representado na figura 6.20, supondo que a locação seja feita com mudanças do teodolito nos pontos 3 e 6, correspondentes aos arcos (acumulados) de 15,00 m e 30,00 m, respectivamente, e supondo que a tangente à espiral na origem tenha azimute igual a  $359^{\circ}18'35''$ .

Os ângulos de deflexão necessários à locação da espiral podem ser calculados com a auxílio das fórmulas vistas, estando a seguir discriminados os cálculos pertinentes apenas aos ângulos de deflexão (de vante e de ré) que correspondem aos pontos de mudanças do teodolito na locação<sup>44</sup>:

- teodolito na origem visando o ponto 3:

$$L_{03} = 15,00\text{m}$$

$$S_{03} = \frac{15,00^2}{2 \cdot 61,41 \cdot 40,00} = 0,045.799\text{rd} \equiv 2^{\circ}37'27''$$

$$y_3 = 15,00 \cdot \left(1 - \frac{0,045.799^2}{10} + \frac{0,045.799^4}{216} - \dots\right) = 14,9969\text{m}$$

$$x_3 = \frac{15,00 \cdot 0,045.799}{3} \cdot \left(1 - \frac{0,045.799^2}{14} + \frac{0,045.799^4}{440} - \dots\right) = 0,2290\text{m}$$

$$i_{03} = \operatorname{arc.tg}\left(\frac{0,2290}{14,9969}\right) = 0^{\circ}52'29''$$

- teodolito no ponto 3 visando a origem (ângulo de ré):

$$j_{30} = S_{03} - i_{03} = 2^{\circ}37'27'' - 0^{\circ}52'29''$$

$$j_{30} = 1^{\circ}44'58''$$

- teodolito no ponto 3 visando o ponto 6:

$$L_{06} = 30,00\text{m}$$

<sup>44</sup> Os valores das coordenadas x e y foram calculados com número de decimais suficiente para não prejudicar a precisão de cálculo dos ângulos de deflexão.

$$S_{06} = \frac{30,00^2}{2 \cdot 61,41 \cdot 40,00} = 0,183.195 \text{rd} \equiv 10^\circ 29'47''$$

$$y_6 = 30,00 \cdot \left( 1 - \frac{0,183.195^2}{10} + \frac{0,183.195^4}{216} - \dots \right) = 29,8995 \text{m}$$

$$x_6 = \frac{30,00 \cdot 0,183.195}{3} \cdot \left( 1 - \frac{0,183.195^2}{14} + \frac{0,183.195^4}{440} - \dots \right) = 1,8276 \text{m}$$

$$i_{36} = \text{arc.tg} \left( \frac{1,8276 - 0,2290}{29,8995 - 14,9969} \right) = 2^\circ 37'27''$$

$$i_{36} = 3^\circ 29'55''$$

- teodolito no ponto 6 visando o ponto 3 (ângulo de ré):

$$j_{63} = (S_{06} - S_{03}) - i_{36} = (10^\circ 29'47'' - 2^\circ 37'27'') - 3^\circ 29'55''$$

$$j_{63} = 4^\circ 22'25''$$

- teodolito no ponto 6 visando o ponto 8 (extremidade da espiral):

$$L_{08} = 40,00 \text{m}$$

$$S_{08} = \frac{40,00^2}{2 \cdot 61,41 \cdot 40,00} = 0,325.680 \text{rd} \equiv 18^\circ 39'36''$$

$$y_8 = 40,00 \cdot \left( 1 - \frac{0,325.680^2}{10} + \frac{0,325.680^4}{216} - \dots \right) = 39,5778 \text{m}$$

$$x_8 = \frac{40,00 \cdot 0,325.680}{3} \cdot \left( 1 - \frac{0,325.680^2}{14} + \frac{0,325.680^4}{440} - \dots \right) = 4,3096 \text{m}$$

$$i_{68} = \text{arc.tg} \left( \frac{4,3096 - 1,8276}{39,5778 - 29,8995} \right) = 10^\circ 29'47''$$

$$i_{68} = 3^\circ 53'14''$$

- teodolito no ponto 8 (extremidade da espiral) visando o ponto 6 (ângulo de ré):

$$j_{86} = (S_{08} - S_{06}) - i_{68} = (18^\circ 39'36'' - 10^\circ 29'47'') - 3^\circ 53'14''$$

$$j_{86} = 4^\circ 16'35''$$

TABELA 6.5 – DEFLEXÕES PARA LOCAÇÃO DA ESPIRAL

ESTACAS	ARCOS <sup>(1)</sup> (m)	DEFLEXÕES		AZIMUTES	OBSERVAÇÕES
		SIMPLES	ACUMULADAS		
⊗ Origem (TS)	-	-	-	359°18'35"	Tangente
Ponto 1	10,00	-	0°05'50"		
Ponto 2	20,00	-	0°23'20"		
⊗ Ponto 3	30,00	-	0°52'29"	1°56'02"	Ré = 1°44'58"
Ponto 4	10,00	-	0°58'19"		
Ponto 5	20,00	-	2°08'17"		
⊗ Ponto 6	30,00	-	3°29'55"	9°48'22"	Ré = 4°22'25"
Ponto 7	10,00	-	1°50'48"		
⊗ Extremidade (SC)	20,00	-	3°53'14"	17°58'11"	Ré = 4°16'35"

<sup>(1)</sup> Arcos acumulados desde os pontos de instalação do teodolito.

Os cálculos para os demais ângulos intermediários necessários à locação podem ser efetuados seguindo o mesmo procedimento, alterando-se apenas os comprimentos dos arcos.

As deflexões resultantes podem ser organizadas no formato de uma caderneta de locação, tal como a apresentada na tabela 6.5, que obedece à mesma convenção adotada para os casos de locação de curvas circulares simples (o leitor é convidado a efetuar o cálculo de alguns desses ângulos, conferindo os resultados com os valores apontados na tabela 6.5).

### 6.8.3 Tabelas de locação

No esquema da figura 6.20 e nos exemplos de cálculos a ele referidos, foi induzida a consideração da locação por estaca fracionária, envolvendo arcos inteiros, assim entendidos os arcos de comprimentos iguais ao da maior corda admitida para o raio da curva circular utilizada para a concordância na extremidade da espiral.

No cálculo das deflexões para a locação da espiral, discriminadas na tabela 6.5, foi feita a suposição da necessidade de mudanças do teodolito nas estações correspondentes aos pontos 3 e 6. Mas, nos casos práticos, não há como saber a priori quanto a eventuais necessidades de mudanças do teodolito por problemas relacionados com a visibilidade dos pontos a locar.

Esta questão pode ser contornada ao se utilizar, nas concordâncias horizontais, espirais de transição com extensões múltiplas de 10,00m, conjugadas a raios de curva fracionários, escolhidos dentre aqueles aos quais correspondem as deflexões "inteiras" (vide comentários a respeito no item 4.3.4), pois se estaria lidando, na verdade, com um elenco limitado de raios de curva combinados com um elenco limitado de espirais de transição.

Isto enseja a possibilidade de se construir tabelas, para as diferentes combinações de raios de curva com espirais de transição, contendo as deflexões que contemplem todas as hipóteses de mudanças de aparelho que possam vir a ocorrer na locação da espiral por estaca fracionária.

Um modelo de tabela de locação largamente difundido, sugerido por CARVALHO (1966), está representado na tabela 6.6, e corresponde ao caso da combinação do raio de curva  $R = 61,41$  m com a espiral de comprimento  $L_C = 40,00$  m que serviu para desenvolvimento do exemplo 6.7 anteriormente visto.

Essa tabela de locação, cujos ângulos podem ser facilmente calculados por meio das fórmulas [6.27] a [6.30], com o auxílio de uma planilha eletrônica, está organizada com uma convenção que permite a imediata leitura de quaisquer deflexões (de vante e de ré) que possam interessar à locação, considerando as diferentes hipóteses de mudanças do teodolito ao longo da curva.

Os símbolos  $\otimes$  representam as estações onde pode ser instalado o teodolito, sendo as deflexões (de vante) lidas na mesma linha onde está instalado o teodolito, na coluna à direita que corresponde ao comprimento do arco locado.

A mudança do teodolito para um ponto que acabou de ser locado corresponde à mudança da linha de leitura para baixo, passando para aquela que contém o símbolo  $\otimes$  na coluna onde foi lida a deflexão do último ponto locado (do ponto de mudança).

Os ângulos de ré podem ser lidos na mesma linha onde está instalado o teodolito, na coluna à esquerda que corresponde à estação onde estava instalado o aparelho, antes da mudança.

As setas em linha cheia representadas na tabela 6.6 indicam os roteiros de leitura dos ângulos que correspondem às deflexões para a locação da espiral que constam na tabela 6.5; as setas em linha pontilhada, por sua vez, correspondem aos roteiros de leitura dos ângulos de ré nas mudanças do teodolito (compare os valores obtidos na tabela 6.5 com os valores do roteiro assinalado na tabela 6.6).

TABELA 6.6 – TABELA DE LOCAÇÃO PARA  $R=61,41$  m e  $L_c = 40,00$ m

	TS	5,00 m	10,00 m	15,00 m	20,00 m	25,00 m	30,00 m	35,00 m	40,00 m
TS	Ä	00°05'50"	00°23'20"	00°52'29"	01°33'18"	02°25'46"	03°29'52"	04°45'35"	06°12'52"
5,00 m	00°11'40"	Ä	00°23'20"	00°58'19"	01°44'58"	02°43'16"	03°53'14"	05°14'50"	06°48'02"
10,00 m	00°46'39"	00°29'10"	Ä	00°40'49"	01°33'18"	02°37'26"	03°53'15"	05°20'42"	06°59'47"
15,00 m	01°44'58"	01°21'38"	00°46'39"	Ä	00°58'19"	02°08'17"	03°29'55"	05°03'13"	06°48'10"
20,00 m	03°06'37"	02°37'27"	01°56'38"	01°04'08"	Ä	01°15'49"	02°43'17"	04°22'25"	06°13'12"
25,00 m	04°51'35"	04°16'35"	03°29'56"	02°31'37"	01°21'38"	Ä	01°33'18"	03°18'16"	05°14'53"
30,00 m	06°59'55"	06°19'03"	05°26'34"	04°22'25"	03°06'36"	01°39'08"	Ä	01°50'48"	03°53'14"
35,00 m	09°31'37"	08°44'52"	07°46'31"	06°36'32"	05°14'53"	03°41'35"	01°56'38"	Ä	02°08'17"
40,00 m	12°26'44"	11°34'04"	10°29'50"	09°13'59"	07°46'51"	06°07'22"	04°16'35"	02°14'07"	Ä

O mesmo esquema de leitura poderia ser adotado visando à obtenção das deflexões para a locação da espiral no sentido contrário, isto é, da extremidade da espiral em direção à sua origem, bastando para tanto que fossem invertidos os sentidos de leitura dos ângulos na tabela de locação<sup>45</sup>: da direita para a esquerda ao se ler as deflexões de vante, mudando as linhas de leitura de baixo para cima nas mudanças de aparelho, e da esquerda para a direita ao se ler os ângulos de ré.

Caso se desejasse efetuar a locação por estaca inteira, poder-se-ia seguir os mesmos procedimentos para o cálculo das deflexões (e ângulos de ré), com o uso das mesmas fórmulas, alterando-se apenas os comprimentos dos arcos, que resultariam, nesse caso, fracionários.

Da mesma forma, se poderia construir tabelas de locação específicas para cada concordância projetada, para aplicação na locação por estaca inteira das espirais de transição. As tabelas teriam que ser específicas para cada concordância, em função dos comprimentos particulares dos arcos fracionários que resultariam em consequência do estaqueamento do projeto.

**EXEMPLO 6.8:** Imagine-se que se queira construir tabelas de locação que permitam a montagem de cadernetas de locação por estaca inteira para as espirais de transição da concordância horizontal do  $PI_2$ , no eixo calculado para o exemplo 6.5.

Aplicando-se as fórmulas [6.27] a [6.30] já vistas, pode-se construir facilmente, com o auxílio de uma planilha eletrônica, as tabelas de locação que constam nas tabelas 6.7 e 6.8, que são específicas, respectivamente, para o primeiro e para o segundo ramo da espiral de transição utilizada na concordância (o leitor é convidado a efetuar o cálculo de alguma dessas deflexões!).

Observe-se, ainda, que a tabela de locação para o segundo ramo da espiral foi construída de forma a possibilitar a locação direta da espiral no sentido do estaqueamento, isto é, no sentido da extremidade da espiral em direção à sua origem, sem necessidade de se inverter o sentido de leitura da tabela.

<sup>45</sup> Isto equivale a se imaginar a tabela de locação virada de "cabeça para baixo", sendo lida no mesmo sentido que o anterior.

TABELA 6.7 – LOCAÇÃO POR ESTACA INTEIRA  
TABELA DE LOCAÇÃO PARA O PRIMEIRO RAMO DA ESPIRAL

Arcos	TS <sub>2</sub>	5,56 m	15,56 m	25,56 m	35,56 m	45,56 m	50,00 m
TS <sub>2</sub>	Ä	00°01'26"	00°11'18"	00°30'29"	00°59'01"	01°36'52"	01°56'39"
5,56 m	00°02'53"	Ä	00°12'27"	00°34'14"	01°05'21"	01°45'47"	02°06'44"
15,56 m	00°22'36"	00°17'07"	Ä	00°26'27"	01°02'14"	01°47'21"	02°10'22"
25,56 m	01°00'58"	00°52'54"	00°31'07"	Ä	00°40'27"	01°30'14"	01°55'19"
35,56 m	01°58'01"	01°47'21"	01°20'54"	00°45'07"	Ä	00°54'27"	01°21'37"
45,56 m	03°13'44"	03°00'28"	02°29'20"	01°48'54"	00°59'07"	Ä	00°29'14"
50,00 m	03°53'20"	03°38'55"	03°05'43"	02°23'12"	01°31'20"	00°30'10"	Ä

TABELA 6.8 – LOCAÇÃO POR ESTACA INTEIRA  
TABELA DE LOCAÇÃO PARA O SEGUNDO RAMO DA ESPIRAL

Arcos	CS <sub>2</sub>	4,85 m	14,85 m	24,85 m	34,85 m	44,85 m	50,00 m
CS <sub>2</sub>	Ä	00°32'51"	01°33'39"	02°25'07"	03°07'16"	03°40'04"	03°53'20"
4,85 m	00°31'45"	Ä	00°58'32"	01°47'45"	02°27'37"	02°58'10"	03°10'16"
14,85 m	01°23'22"	00°53'52"	Ä	00°44'32"	01°19'45"	01°45'37"	01°55'19"
24,85 m	01°56'19"	01°29'05"	00°39'52"	Ä	00°30'32"	00°51'45"	00°59'02"
34,85 m	02°10'35"	01°45'37"	01°01'05"	00°25'53"	Ä	00°16'32"	00°21'25"
44,85 m	02°06'12"	01°43'30"	01°03'38"	00°33'05"	00°11'53"	Ä	00°02'29"
50,00 m	01°56'39"	01°35'07"	00°57'39"	00°29'31"	00°10'43"	00°01'14"	Ä









## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 BRASIL. **Decreto-Lei nº 8.463, de 27 de dezembro de 1945**. Reorganiza o Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, cria o Fundo Rodoviário Nacional e dá outras providências. **LEX Coletânea de legislação e jurisprudência** : Legislação federal e marginalia. São Paulo : LEX LTDA. Editôra [sic], 1945. Ano IX, p. 671-684.
- 2 \_\_\_\_\_. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – DNER. **Classificação funcional do sistema rodoviário do Brasil**. [Rio de Janeiro] : [s.n.], 1974.
- 3 \_\_\_\_\_. \_\_\_\_\_. **Instruções para o projeto geométrico de rodovias rurais**. Rio de Janeiro : [s.n.], 1979.
- 4 \_\_\_\_\_. \_\_\_\_\_. **Manual de projeto de engenharia rodoviária**. Rio de Janeiro : Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 1974.
- 4 \_\_\_\_\_. \_\_\_\_\_. **Manual de projeto geométrico de rodovias rurais**. Rio de Janeiro : Copiarte, 1999.
- 5 \_\_\_\_\_. \_\_\_\_\_. **Manual de serviços de consultoria para estudos e projetos rodoviários**. 2 vol. Rio de Janeiro : Schulze, 1978.
- 6 \_\_\_\_\_. \_\_\_\_\_. **Normas para o projeto de estradas de rodagem**. Rio de Janeiro : [s.n.], 1975.
- 7 \_\_\_\_\_. Ministério dos Transportes - MT. **Plano Nacional de Viação**. Rio de Janeiro : C.N.T., 1973.
- 8 \_\_\_\_\_. Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes – GEIPOT. **Anuário estatístico dos transportes – 1999**. Brasília : [s.n.], 1999.
- 9 \_\_\_\_\_. **Lei nº 302, de 13 de julho de 1948**. Estabelece normas para a execução do parágrafo 2º do artigo 15 da Constituição Federal, na parte referente àtribuição de lubrificantes e combustíveis líquidos. São Paulo , LEX LTDA. Editôra [sic], 1948. Ano XII, p. 229-234.
- 10 CARVALHO, Manoel Pacheco de. **Curso de estradas**. Rio de Janeiro : Ed. Científica, 1966.
- 11 CORDIOLI, Celito. **Trânsito = ou <sup>1</sup> tráfego** : Terminologia técnica da engenharia de trânsito e de acidentes de tráfego. Florianópolis : IOESC, 1995.
- 12 Departamento de Estradas de Rodagem de Santa Catarina – DER/SC. **Diretrizes para a concepção de estradas** : condução do traçado – DCE-C. Florianópolis : DER/SC, 1999.
- 13 \_\_\_\_\_. **Diretrizes para a construção de estradas** : traçado das linhas – DCE-T. Florianópolis : DER/SC, 1993.
- 14 FONSECA, Rômulo Soares. **Elementos de desenho topográfico**. São Paulo : McGraw-Hill do Brasil, 1973.
- 15 MELLO, José Carlos. **Planejamento dos transportes**. São Paulo : McGraw-Hill do Brasil, 1975.
- 16 NATIONAL RESEARCH COUNCIL. Transportation Research Board – TRB. **Highway capacity manual** : Special report 209. 3rd. Ed. Washington, D.C. : TRB. 1994.
- 17 OLIVEIRA, Dulce E. **Código de Trânsito Brasileiro**. São Paulo : Rideel, 1997.
- 18 PITTA, Álvaro; SIMON, Manoel F. et LEE, Shu H. **Alguns aspectos para elaboração de planos funcionais visando o aumento da capacidade e da segurança de rodovias** – proposição de instruções de serviço. In: Reunião Anual de Pavimentação da ABPv (24. : 1990 : Belém/PA). Anais. Belém : [s.n.], 1990. v.1, p. 498-533.

- 19 AASHTO (American Association of State Highway And Transportation Officials). *A policy on geometric design of highways and streets*. Washington, D.C. : AASHTO, 1994. (não disponível na BU).