

PROJETO GEOMÉTRICO DE RODOVIAS

ALEJANDRO RUIZ-PADILLO

RAFAEL CEZAR WASQUEVITI

THAIS ROOS DUTRA

TATIANA CUREAU CERVO

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
LABORATÓRIO DE MOBILIDADE E LOGÍSTICA

PROJETO GEOMÉTRICO DE RODOVIAS

Santa Maria, RS

2023

P964 Projeto geométrico de rodovias [recurso eletrônico] / [coordenadores: Vanessa Teresinha Alves, Alejandro Ruiz-Padillo ; autores: Alejandro Ruiz-Padillo, Rafael Cezar Wasqueviti, Thais Roos Dutra, Tatiana Cureau Cervo]. – Santa Maria, RS : UFSM, Centro de Tecnologia, Laboratório de Mobilidade e Logística, 2023.
1 e-book : il.

ISBN 978-85-64049-24-6

1. Rodovias - projeto geométrico 2. Vias rurais 3. Altimetria
4. Planimetria 5. Superelevação 6. Superlargura 7. Seção transversal
I. Alves, Vanessa Teresinha II. Ruiz-Padillo, Alejandro III. Wasqueviti,
Rafael Cezar IV. Dutra, Thais Roos V. Cervo, Tatiana Cureau

CDU 625.72

Ficha catalográfica elaborada por Lizandra Veleda Arabidian - CRB-10/1492
Biblioteca Central - UFSM



**UNIVERSIDADE FEDERAL
DE SANTA MARIA (UFSM)**

Reitor

Luciano Schuch

Vice-Reitora

Martha Bohrer Adaime



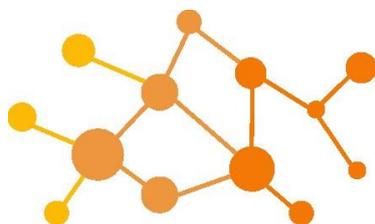
**CENTRO DE TECNOLOGIA
(CT-UFSM)**

Diretor

Tiago Marchesan

Vice-Diretora

Tatiana Cureau Cervo



LAMOT
LABORATÓRIO DE MOBILIDADE E LOGÍSTICA

LABORATÓRIO DE MOBILIDADE E LOGÍSTICA (LAMOT)

Coordenadores

Vanessa Teresinha Alves

Alejandro Ruiz-Padillo

Autores:

Alejandro Ruiz-Padillo, Dr. Eng.

Rafael Cezar Wasqueviti

Thais Roos Dutra

Tatiana Cureau Cervo, Dra. Eng.

Qualquer parte desta publicação pode ser reproduzida, desde que citada a fonte.

Nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida por qualquer meio, sem a prévia autorização desta entidade.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à direção do Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Santa Maria pela oportunidade e apoio para desenvolver o presente material. Também agradecem especialmente aos colegas do LAMOT, acadêmico Wilian Lemos Rhoden pela ajuda no desenvolvimento de imagens e exercícios, acadêmica Ester Schmitt Duarte pelas contribuições, e acadêmico Waliston Euripedes dos Santos pela ajuda na criação da capa do livro.

Igualmente, os autores agradecem à Pró-Reitoria de Graduação da Universidade Federal de Santa Maria pelo apoio através do Fundo de Incentivo ao Ensino (FIEEn) no projeto de ensino nº 056371 “Aplicação de metodologias ativas e experiências inovadoras de ensino-aprendizagem tecnológico”. O prof. Alejandro Ruiz-Padillo agradece também ao CNPq pelo apoio financeiro (processo 310258/2021-9).

APRESENTAÇÃO

No vasto território que é o Brasil, onde a diversidade geográfica é tão forte quanto sua riqueza cultural, as rodovias desempenham um papel crucial na conectividade e no desenvolvimento do país. Desde o início do século XX, quando os primeiros quilômetros de estradas pavimentadas começaram a se estender pelo território nacional, as rodovias têm sido uma força motriz por trás do crescimento econômico e social do país. O Brasil hoje depende amplamente delas para o transporte de mercadorias, passageiros e o acesso a áreas remotas. Além de impulsionar o comércio interno e internacional, as rodovias são de suma importância na integração regional, permitindo o desenvolvimento de regiões distantes dos centros urbanos e contribuindo para a redução das desigualdades socioeconômicas. Investimentos contínuos na expansão, modernização e manutenção da rede rodoviária são essenciais para garantir a mobilidade, o desenvolvimento econômico e a qualidade de vida da população brasileira.

Boas rodovias precisam de bons projetos de engenharia, os quais passam necessariamente pelo cuidadoso estudo da geometria dos seus elementos. O estudo do projeto geométrico de rodovias desempenha um papel importante na formação de engenheiros civis, uma vez que fornece as bases para o planejamento, projeto e construção de estradas seguras e eficientes. Um projeto geométrico bem elaborado leva em consideração fatores como curvas, aclives, declives, largura das faixas, inclinações das pistas e taludes e visibilidade, visando criar condições ideais para a circulação de veículos e a segurança dos usuários. Quando engenheiros civis aplicam esses princípios, o impacto na vida das pessoas é significativo. Estradas bem projetadas reduzem o risco de acidentes, economizam tempo de viagem, diminuem o consumo de combustível, facilitam o acesso a serviços e oportunidades, além de contribuir para o desenvolvimento econômico e social das regiões por onde passam.

A presente obra visa apresentar de forma didática todos os conceitos básicos para a elaboração de um projeto geométrico de rodovia. O primeiro capítulo introduz o estudo de rodovias, com suas normas, classificações e nomenclaturas. Já o segundo capítulo trata do estudo do traçado, apresentando todas as etapas necessárias para sua realização. Os dois capítulos subsequentes tratam, respectivamente, do estudo da planimetria e da altimetria, para cálculo e representação da rodovia em planta e perfil. O quinto capítulo trata da superelevação e superlargura, assuntos fundamentais no desenvolvimento de um projeto rodoviário completo. Por fim, no sexto capítulo é apresentado o projeto e os elementos que compõem a seção

transversal de uma rodovia, encerrando assim o processo de criação de rodovias seguras e eficientes desde o ponto de vista da geometria.

Devido a que muitos dos elementos geométricos de uma rodovia dependem de como outros foram definidos, eles são apresentados de forma sequencial e ordenada como normalmente são desenvolvidos nos estudos de engenharia rodoviária. Portanto, se recomenda ao leitor que siga a ordem estabelecida na obra ou, caso se aproxime a algum dos capítulos ou seções em especial, se ajude do sumário e listas incluídas no início da obra para complementar os conceitos que achar necessários.

Ótima leitura!

Os autores

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Via urbana.	24
Figura 2: Via rural.	24
Figura 3: Rodovia.	25
Figura 4: Modelagem do corpo estradal.	25
Figura 5: Recorte de vista planimétrica.	26
Figura 6: Estaca.	27
Figura 7: Recorte de perfil longitudinal.	28
Figura 8: Seções transversais.	29
Figura 9: Seção transversal de rodovia de pista simples.	30
Figura 10: Normas fundamentais de projeto geométrico de rodovias.	32
Figura 11: Projeto final.	39
Figura 12: Estudos primários de planejamento de traçado de rodovias.	42
Figura 13: Software QGIS.	43
Figura 14: Escolas clássica e moderna de traçado de rodovias.	44
Figura 15: Representação de curvas de nível em software GIS (“mapa de calor”).	46
Figura 16: Representação plana de curvas de nível (mapa - 2D)	47
Figura 17: Representação volumétrica de curvas de nível (maquete - 3D)	47
Figura 18: Planície.	49
Figura 19: Planície em representação de curvas de nível.	49
Figura 20: Planalto.	50
Figura 21: Planalto em representação de curvas de nível.	50
Figura 22: Serras.	51
Figura 23: Encostas	51
Figura 24: Encostas em representação de curvas de nível.	52
Figura 25: Divisor de águas.	52
Figura 26: Divisor de águas em representação de curvas de nível.	53
Figura 27: Vale.	53
Figura 28: Vale em representação de curvas de nível.	54
Figura 29: Talwegues em representação de curvas de nível.	54
Figura 30: Contraforte.	55
Figura 31: Contraforte em representação de curvas de nível.	55
Figura 32: Garganta.	56



Figura 33: Garganta em representação de curvas de nível.	56
Figura 34: Projeções Δx e Δy dos alinhamentos.	61
Figura 35: Quadrantes geográficos.	61
Figura 36: Comprimento do alinhamento.	62
Figura 37: Rumos de alinhamentos.	63
Figura 38: Relação entre rumos e azimutes.	64
Figura 39: Deflexões entre alinhamentos.	65
Figura 40: Exemplo de planilha da poligonal aberta.	66
Figura 41: Representação planimétrica com curvas de concordância horizontal.	67
Figura 42: Diagrama de escolha de raio de curva de concordância horizontal.	69
Figura 43: Critérios desejáveis para orientar a escolha dos raios de curvas sucessivas.	70
Figura 44: Desenho da curva de concordância horizontal circular simples.	71
Figura 45: Clotóide.	73
Figura 46: Desenho da curva horizontal composta com transição.	74
Figura 47: Intertangente negativa.	78
Figura 48: Intertangente insuficiente.	80
Figura 49: Planilha de coordenadas.	83
Figura 50: Construção da ponte do Vale do Menino Deus.	84
Figura 51: Viaduto sobre o Guaíba.	84
Figura 52: Prancha de projeto executivo.	89
Figura 53: Exercício sobre planilha de coordenadas planimétricas.	93
Figura 54: Exercício sobre planilha de coordenadas planimétricas.	94
Figura 55: Rodovia em rampa.	97
Figura 56: Trecho rodoviário com rampa acentuada.	99
Figura 57: Rampa mínima.	100
Figura 58: Acúmulo indesejável de água em curvas côncavas em cortes.	101
Figura 59: Aterro sobre solos moles.	102
Figura 60: Corte alto.	103
Figura 61: Bueiro com recobrimento insuficiente.	104
Figura 62: Bueiro com recobrimento necessário.	105
Figura 63: Curvas verticais sem coordenação com trechos de curvas horizontais.	106
Figura 64: Curvas verticais coincidentes com trechos de curvas horizontais.	107
Figura 65: Limitação de visibilidade de parada por concordância vertical.	109

Figura 66: Desenho da curva de concordância vertical.....	110
Figura 67: Tipos de curvas de concordância vertical.	111
Figura 68: Representação do greide de um trecho rodoviário.....	114
Figura 69: Exemplo de planilha de coordenadas almetricas	116
Figura 70: Cálculo do greide	118
Figura 71: Exercício de altimetria	126
Figura 72: Exercício sobre planilha de coordenada altimetricas.....	127
Figura 73: Forças atuantes sobre veículos em trajetórias curvilíneas.	130
Figura 74: Alargamento simétrico.....	135
Figura 75: Alargamento assimétrico.....	136
Figura 76: Distribuição da superelevação na curva circular composta	137
Figura 77: Distribuição na curva circular simples.....	139
Figura 78: Exercício de superlargura e superelevação.	141
Figura 79: Seção transversal de rodovia de pista dupla.....	145
Figura 80: Folgas.....	149
Figura 81: Taludes do terreno.....	150
Figura 82: Rodovia em corte com banquetas e valetas de proteção.....	151
Figura 83: Declividade transversal do acostamento do lado interno de curvas horizontais...	155
Figura 84: Declividade transversal do acostamento do lado externo de curvas horizontais (largura > 1,20m).....	156

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Critérios de classificação de relevo da região no Rio Grande do Sul e no Paraná...	34
Tabela 2: Velocidades diretrizes para projetos de rodovias.	35
Tabela 3: Classificação das dimensões dos veículos de carga para projeto de rodovias.....	36
Tabela 4: Raio mínimo para projeto de curva horizontal composta.....	68
Tabela 5: Raio mínimo para projeto de curva horizontal simples.	68
Tabela 6: $l_{c_{min}}$ segundo a velocidade diretriz.....	75
Tabela 7: Exercício de poligonal aberta.	92
Tabela 8: Rampas máximas.	100
Tabela 9: Distância mínima de ultrapassagem.	109
Tabela 10: Valores de K mínimos e desejáveis para projeto de curvas de concordância vertical.	113
Tabela 11: Valores mínimos de raio para dispensa da superelevação de acordo com a velocidade diretriz.....	131
Tabela 12: Valores máximos de superelevação em curvas de concordância horizontal.	132
Tabela 13: Valores mínimos de raio para dispensa da superlargura em trechos em curva com largura básica da pista em tangente = 7,20 m.....	133
Tabela 14: Valores mínimos de raio para dispensa da superlargura em trechos em curva com largura básica da pista em tangente = 6,60 m.....	133
Tabela 15: Valores de C para distribuição da superelevação e superlargura em curvas de concordância horizontal circular simples.	138
Tabela 15: Largura das faixas de rolamento em tangentes (em metros).	146
Tabela 16: Largura dos acostamentos externos (em metros).	147
Tabela 17: Largura dos acostamentos internos (em metros) para pistas de mão única - Classe 0 ou I-A.....	147
Tabela 18: Largura do canteiro central.....	148

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	23
1.1. REPRESENTAÇÃO GEOMÉTRICA DAS RODOVIAS.....	25
1.1.1. Vista planimétrica.....	25
1.1.2. Perfil longitudinal.....	28
1.1.3. Seções transversais.....	29
1.2. NORMAS PARA O PROJETO GEOMÉTRICO.....	31
1.3. PARÂMETROS DE PROJETO DE RODOVIAS.....	32
1.3.1. Classificação técnica das rodovias.....	32
1.3.2. Região.....	33
1.3.3. Velocidade Diretriz.....	34
1.3.4. Veículo de Projeto.....	35
2. ESTUDO DE TRAÇADO.....	37
2.1. ETAPAS DO PLANEJAMENTO DE UMA RODOVIA.....	37
2.1.1. Estudos de Campo.....	37
2.1.2. Anteprojeto.....	38
2.1.3. Projeto final.....	38
2.1.4. Projeto As-Built.....	41
2.2. ETAPAS DO ESTUDO DO TRAÇADO.....	41
2.2.1. Reconhecimento.....	41
2.2.2. Exploração.....	43
2.3. ESCOLAS DE TRAÇADO.....	44
2.3.1. Escola clássica.....	44
2.3.2. Escola moderna.....	45
2.4. CONDICIONANTES DE TRAÇADO.....	45
2.4.1. Relevo.....	46
2.4.2. Outras condicionantes de traçado.....	57
3. PLANIMETRIA.....	59
3.1. POLIGONAL ABERTA.....	59
3.1.1. Definições e cálculos dos elementos.....	59
3.1.2. Planilha da Poligonal Aberta.....	66



3.2. CURVAS DE CONCORDÂNCIA HORIZONTAL.....	67
3.2.1. Tipos de curvas de concordância horizontal.....	67
3.2.2. Escolha do raio das curvas de concordância horizontal	68
3.2.3. Curva circular simples	70
3.2.4. Curva composta com transições	73
3.2.5. Inconformidades Planimétricas	77
3.3. PLANILHA DE COORDENADAS.....	81
3.3.1. Estaqueamento.....	81
3.3.2. Planilha de coordenadas	82
3.3.3. Elementos planimétricos de uma estaca qualquer	84
3.3.4. Desenho planimétrico	88
3.4. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS PLANIMÉTRICAS	89
3.4.1. Acréscimo sobre a diretriz.....	89
3.4.2. Tortuosidade	90
3.5. EXERCÍCIOS.....	91
4. ALTIMETRIA	97
4.1. LANÇAMENTO DAS RAMPAS DO PROJETO ALTIMÉTRICO.....	98
4.1.1. Minimização das inclinações.....	98
4.1.2. Rampa máxima.....	99
4.1.3. Rampa Mínima	100
4.1.4. Curvas em cortes	101
4.1.5. Terrenos alagadiços	101
4.1.6. Otimização das massas	102
4.1.7. Cortes e aterros elevados	103
4.1.8. Bueiros.....	104
4.1.9. Características geológicas.....	105
4.1.10. Impulso	105
4.1.11. Perfil de terraplenagem.....	106
4.1.12. Harmonia entre planimetria a altimetria.....	106
4.1.13. Pontos obrigatórios de passagem.....	107
4.1.14. Visibilidade.....	108
4.2. PROJETO DAS CURVAS DE CONCORDÂNCIA VERTICAL.....	109

4.2.1. Caracterização geométrica das curvas de concordância vertical.....	109
4.2.2. Cálculo das curvas de concordância vertical.....	111
4.3. PROJETO DO GREIDE.....	113
4.3.1. Elementos das rampas.....	113
4.3.2. Elementos das curvas de concordância horizontal.....	114
4.3.3. Cálculo do greide.....	117
4.3.4. Cotas características de projeto.....	119
4.3.5. Análise das inconformidades altimétricas.....	120
4.3.6. Desenho altimétrico.....	122
4.4. COMPRIMENTO VIRTUAL.....	123
4.5. EXERCÍCIOS.....	125
5. SUPERELEVAÇÃO E SUPERLARGURA.....	129
5.1. SUPERELEVAÇÃO.....	129
5.1.1. Necessidade.....	129
5.1.2. Abaulamento.....	130
5.1.3. Casos de dispensa de superelevação.....	131
5.1.4. Valores mínimos, máximos e adotados de superelevação.....	131
5.2. SUPERLARGURA.....	132
5.2.1. Valor mínimo e casos de dispensa de superlargura.....	133
5.2.2. Cálculo de superlargura.....	134
5.2.3. Implantação da superlargura.....	135
5.3. DISTRIBUIÇÃO DA SUPERELEVAÇÃO E DA SUPERLARGURA.....	136
5.3.1. Distribuição na curva circular composta.....	136
5.3.2. Distribuição na curva circular simples.....	138
5.4. EXERCÍCIOS.....	139
6. SEÇÕES TRANSVERSAIS.....	143
6.1. PARTES E TIPOS DA SEÇÃO TRANSVERSAL.....	143
6.2. PROJETO DA SEÇÃO TRANSVERSAL.....	144
6.2.1. Seções do terreno.....	144
6.2.2. Plataforma de terraplenagem.....	144
6.2.3. Taludes do terreno.....	149
6.2.4. Off-Sets.....	152

6.2.5. Valeta de proteção de corte	152
6.3. CONFORMAÇÃO E DECLIVIDADES DA PISTA E DOS ACOSTAMENTOS.....	153
6.3.1. Conformação da pista em tangente.....	153
6.3.2. Declividades da pista e dos acostamentos em tangente.....	153
6.3.3. Declividades da pista e dos acostamentos em curva	154
6.4. EXERCÍCIOS.....	157
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	159

1. INTRODUÇÃO

As rodovias desempenham um papel fundamental na sociedade, permitindo o deslocamento de pessoas e mercadorias, beneficiando a mobilidade e a acessibilidade. As disciplinas de rodovias são um dos pilares fundamentais para a formação de um bom engenheiro civil. O presente material visa abranger os principais tópicos do planejamento e desenvolvimento do projeto geométrico de infraestruturas rodoviárias, suas normas e diretrizes. Além disso, o aluno aprende a projetar estradas seguras, sustentáveis e eficientes, levando em consideração os aspectos técnicos, ambientais e econômicos.

Nesse sentido, cabe destacar que a elaboração de um projeto rodoviário, como todo projeto de engenharia, é um processo geralmente colaborativo, que envolve a concepção, planejamento e elaboração de soluções técnicas com um objetivo particular para atender a demanda de uma área específica da engenharia, que nesse caso é a posterior construção de uma rodovia. Portanto, o projeto é a representação do real em uma escala reduzida, através de um modelo simplificado que permite o estudo, o cálculo e a elaboração de infraestrutura, de acordo com as regras pré-determinadas, estabelecidas pelas normas.

Segundo o Código Brasileiro de Trânsito (Lei N°. 9.503, de 23 de setembro de 1997, que entrou em vigor em 08 de janeiro de 1998), faz-se a utilização das seguintes definições:

- **Via rural:** vias para o transporte rodoviário que apresentam seus extremos situados fora de área urbana.
- **Via urbana:** são aquelas vias caracterizadas principalmente por possuírem imóveis edificadas ao longo de sua extensão, como ruas e avenidas, conforme ilustrado na Figura 1.
- **Estrada:** via rural não pavimentada, como mostra a Figura 2.
- **Rodovia:** via rural pavimentada (Figura 3).

Embora suas definições técnicas sejam diferentes, neste material, os termos “estrada” e “rodovia” serão tratados de forma análoga para simplificar a comunicação. Reconhece-se que podem existir distinções em relação à capacidade, função e regulamentações específicas, mas desde o ponto de vista da geometria da via, que é foco do presente livro, os fundamentos são similares.



Figura 1: Via urbana.



Fonte: Autores.

Figura 2: Via rural.



Fonte: Autores.

Figura 3: Rodovia.

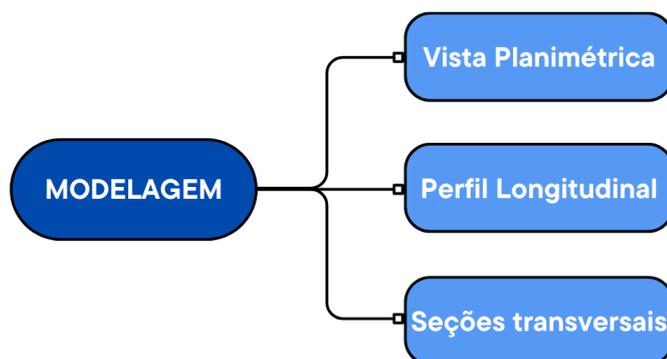


Fonte: Autores.

1.1. REPRESENTAÇÃO GEOMÉTRICA DAS RODOVIAS

Chama-se de “corpo estradal” à composição espacial (forma) assumida por uma rodovia. Já a sua caracterização (modelagem e projeto) é realizada pela representação gráfica no espaço, de acordo com diferentes vistas, como apresentado na Figura 4.

Figura 4: Modelagem do corpo estradal.



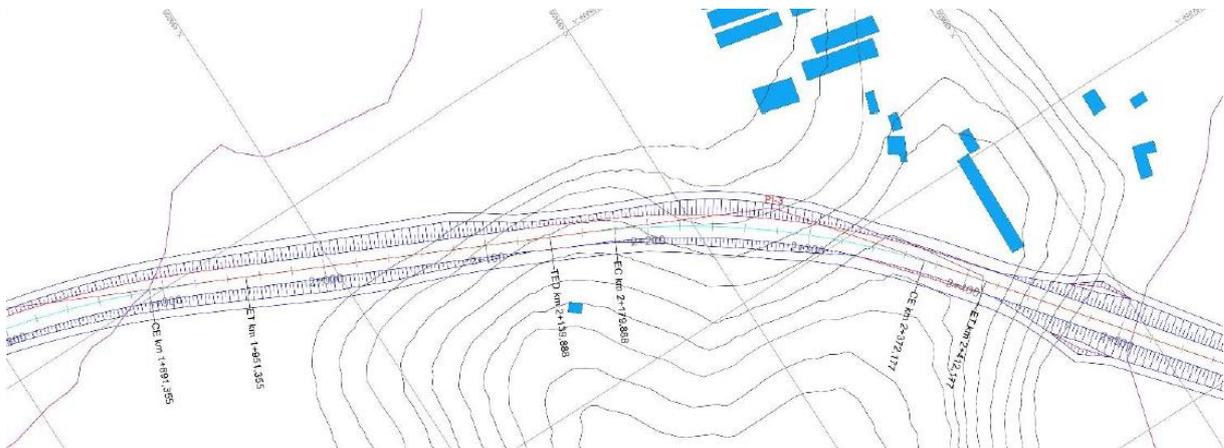
Fonte: Autores.

1.1.1. Vista planimétrica

Dá-se o nome de vista planimétrica à planta baixa de uma rodovia. Isto é, a projeção horizontal dos elementos do projeto e do terreno. A superfície do terreno é representada pelas curvas de nível, já o projeto planimétrico é formado pelos seguintes elementos (Figura 5):

- **Eixo:** é o centro geométrico de uma rodovia em planta, geralmente representado por uma linha ao longo da qual a rodovia é construída, composta por sucessão de tangentes e curvas. Serve como referência para o projeto e construção.
- **Estacas:** definem e materializam o eixo. O estaqueamento inicia na origem estabelecida para o trecho e cresce ao longo da rodovia de 20 em 20 metros.
- **Intertangente:** também chamado de alinhamento reto ou tangente, fica localizado entre curvas horizontais. É o trecho retilíneo que compõe uma rodovia, tangente às curvas consecutivas, caracterizado pelo seu comprimento.
- **Curva de concordância horizontal:** é o elemento de projeto utilizado para realizar facilitar a passagem de uma intertangente para outra, mudando a direção da rodovia. A curva é caracterizada pelo raio de curvatura, cujo valor leva em consideração diversos fatores, como a velocidade do projeto, o tipo de veículo que utilizará a rodovia, características do terreno e visibilidade.

Figura 5: Recorte de vista planimétrica.



Fonte: Autores.

Para locação do eixo de um determinado trecho de rodovia, são definidas as estacas partindo de um ponto inicial, normalmente estabelecido como quilômetro 0 ou estaca 0. A seguinte estaca é posicionada a 20 metros desse ponto inicial, sendo representada como Est 1+00,000m ou como km 0+020,000, ou simplesmente Est 1+00 m ou km 0+020. A segunda estaca adota a notação de Est 2+00 m ou km 0+040 e as demais estacas seguem um padrão similar (Figura 6). Ao alcançar a marca de 1 km desde o ponto inicial, a estaca, que seria Est 50+00 m, passa a ser denominada como km 1+000, marcando assim o início do segundo quilômetro. Por exemplo, uma estaca localizada exatamente a 2120 m do ponto de partida, é identificada como Est 106+00 m ou km 2+120. A notação como estaca costuma ser utilizada

em fases de estaqueamento provisório do trecho, como nos estudos de traçado abordados no próximo capítulo, enquanto a notação quilométrica é a mais comum já nas etapas de projeto geométrico.

Figura 6: Estaca.



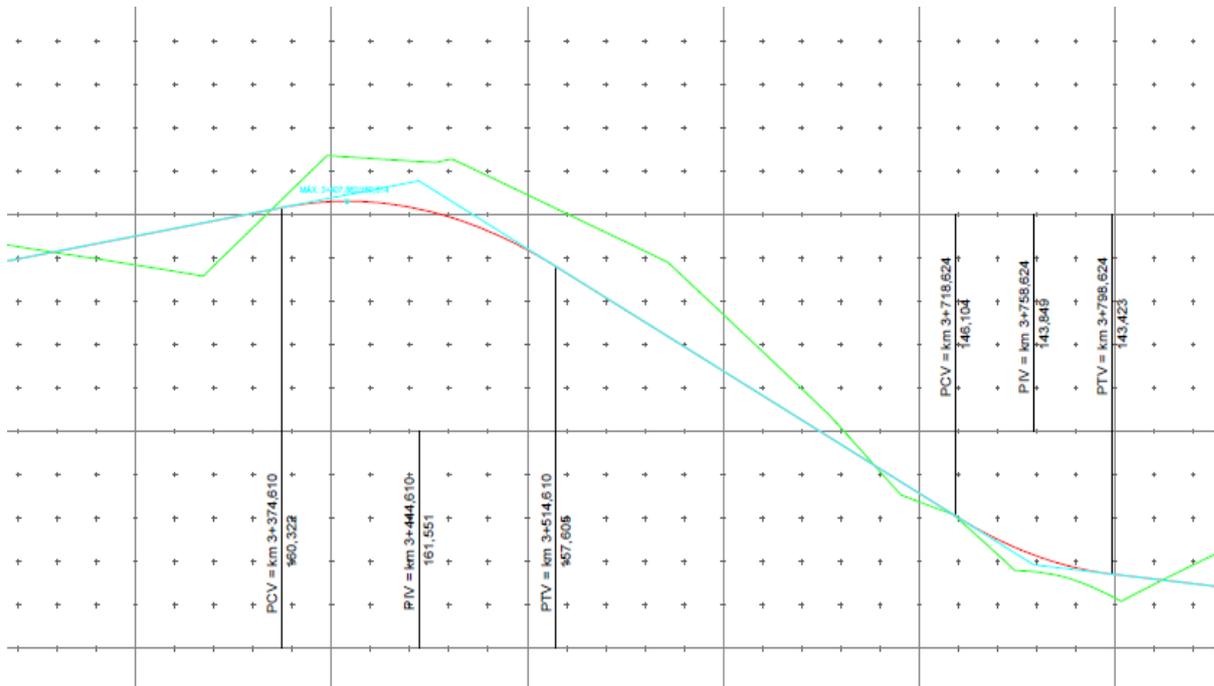
Fonte: Autores.

Por outro lado, quando se deseja realçar um detalhe específico do projeto que não coincide com uma estaca completa, é comum utilizar uma estaca intermediária, posicionada entre os intervalos de 20 metros. Por exemplo, a estaca localizada a 1117,492 m do ponto de partida seria denominada como Est 55+17,492 m ou km 1+117,492 m. Essa prática é amplamente empregada na engenharia rodoviária para facilitar a identificação e a localização precisa de pontos relevantes ao longo do trecho em questão.

1.1.2. Perfil longitudinal

O perfil longitudinal de uma rodovia é a representação gráfica de um corte vertical no corpo estradal, através de uma superfície perpendicular e coincidente com o eixo da rodovia. São componentes do eixo longitudinal (Figura 7):

Figura 7: Recorte de perfil longitudinal.



Fonte: Autores.

- **Linha do terreno natural:** é a representação da variação do terreno natural através da interseção deste com a superfície vertical que determina o perfil. Faz-se o uso de escalas verticais e horizontais deformadas para facilitar a visualização dos desníveis.
- **Greide:** também conhecida como linha de projeto, é uma linha em perfil longitudinal posicionada judiciosamente em relação ao terreno natural que define a variação altimétrica da via ao longo do seu comprimento. O posicionamento dessa linha em relação à linha natural do terreno indica a ocorrência de cortes e aterros. O perfil do greide pode ser definido pelo valor da cota que adota o eixo da rodovia em cada estaca.
- **Declividade:** é a taxa de acréscimo ou decréscimo altimétrico do greide, normalmente expressa em porcentagem. Pode ser apresentada nas seguintes formações:
 - **Active** ou em rampa: é o trecho com declividade constante (trecho ascendente), seguindo a origem do estaqueamento;

- **Declive** ou contra rampa: é o trecho com declividade constante (trecho descendente), segundo a origem do estaqueamento.
- **Em nível** ou nula: quando não há declividade.
- **Curva de concordância vertical:** é a curva que concorda geometricamente duas rampas sucessivas e que permite trechos com inclinação variável, mudando da inclinação da rampa anterior para a inclinação da rampa posterior. O projeto de curva é definido por condições de visibilidade, custos e operações da via.

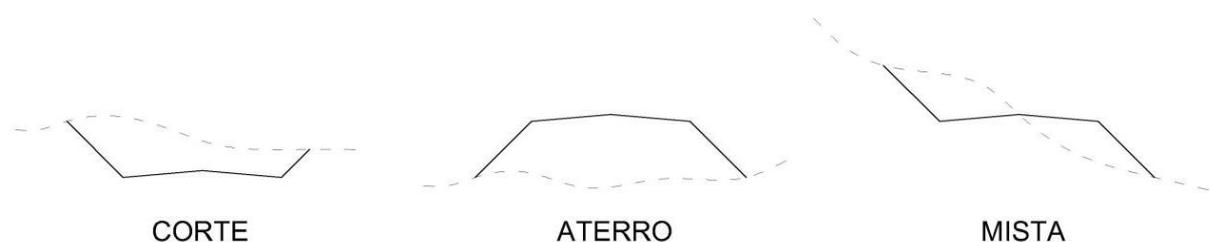
1.1.3. Seções transversais

As seções transversais são obtidas de planos verticais, perpendiculares e transversais ao eixo rodoviário, localizados em cada uma das estacas (de 20 em 20 metros) ou estacas específicas. Uma seção transversal de rodovia é composta por duas linhas, resultantes da interseção desses planos verticais:

- **Perfil transversal do terreno natural.**
- **Perfil transversal de projeto.**

A Figura 8 apresenta os diferentes tipos de seções transversais, segundo a relação entre as cotas das duas linhas anteriores. Assim, uma **seção em corte** é aquela em que o perfil transversal do projeto fica a uma cota inferior da linha de terreno natural, sendo necessário, escavar para a construção da rodovia, enquanto uma **seção em aterro** se configura como aquela em que o perfil transversal do projeto se projeta a uma cota superior à do terreno natural, ou seja, é necessário adicionar terras. Uma **seção mista**, por fim, apresenta nela parte em corte e parte em aterro, sendo bastante comum nas estacas de transição entre os tipos anteriores.

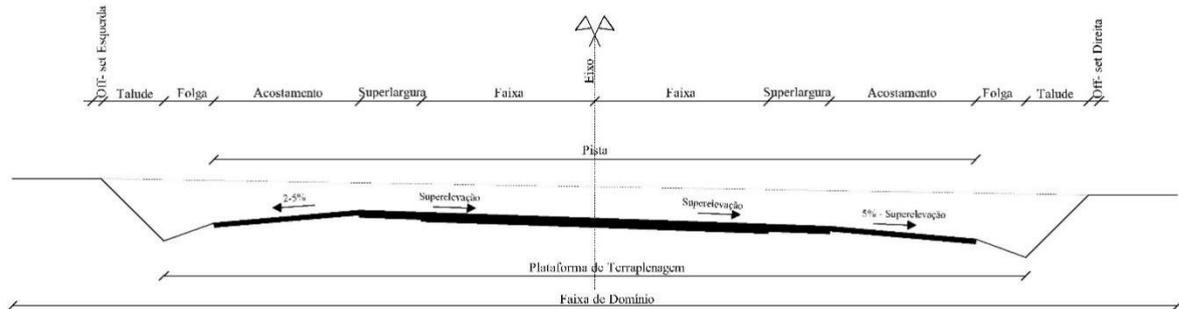
Figura 8: Seções transversais.



Fonte: Autores.

Os componentes geométricos das seções transversais, que se podem observar na Figura 9, são:

Figura 9: Seção transversal de rodovia de pista simples.



Fonte: Autores.

- **Taludes:** é a superfície inclinada que delimita o corte e o aterro lateralmente. Os valores de inclinação variam em 1:1,5; 1:2; 1,5:1 (sempre na vertical/horizontal).
- **Off-Set:** é a interseção dos taludes de corte e aterro e a superfície topográfica natural. No corte é chamado de crista de corte e no aterro se denomina pé do aterro.
- **Plataforma de terraplenagem:** é a superfície convexa final, construída por terraplenagem e limitada lateralmente pelos taludes de corte ou aterro. Apresenta as seguintes características geométricas:
 - **Largura da plataforma:** depende da hierarquia da rodovia. Além disso, a largura da plataforma de corte geralmente é maior que a plataforma de aterro, pois há uma necessidade no dimensionamento das sarjetas de drenagem.
 - **Abaulamento:** é a inclinação transversal dada à plataforma de terraplenagem, cujo valor depende da textura da superfície do rolamento. Sua função principal é retirar a água da plataforma nos trechos em intertangente.
 - **Superelevação:** é a inclinação transversal projetada para a plataforma nos trechos em curva para compensar a força centrífuga e proporcionar uma trajetória segura e estável para os usuários da via, além de favorecer a drenagem da plataforma.
 - **Superlargura:** é a ampliação da largura da plataforma em curvas. É projetada para acomodar a necessidade de espaço adicional de veículos maiores ao fazer uma curva, permitindo que eles mantenham uma trajetória segura sem invadir a faixa oposta.
- **Plataforma de pavimentação:** é a largura superior do pavimento de uma rodovia e está constituída por:

- **Pista:** é a plataforma destinada ao tráfego de veículos, geralmente pavimentada. Pode ser classificada como: pista simples ou pista dupla.
- **Faixa de tráfego:** é a parte da pista destinada ao fluxo de veículos no mesmo sentido. Cada pista possui duas ou mais faixas.
- **Terceira faixa:** geralmente é uma faixa adicional projetada para facilitar o tráfego de veículos pesados nas rampas ascendentes muito inclinadas e longas em rodovias de pista simples.
- **Acostamento:** é uma faixa lateral a cada lado da pista, reservada para uso emergencial e para aumentar a segurança dos usuários em caso de necessidade de parada. Também pode servir como área de escape em situações de risco.
- **Faixa de domínio:** é uma área de terreno destinada à instalação, manutenção e proteção da rodovia. É reservada para uso exclusivo da operação rodoviária e compreende o espaço da plataforma de terraplenagem e áreas adjacentes. A faixa de domínio é delimitada por elementos físicos no terreno e tem o objetivo de garantir a segurança, integridade e eficiência da rodovia. Construções ou atividades dentro dessa área requerem permissão específica das autoridades responsáveis.

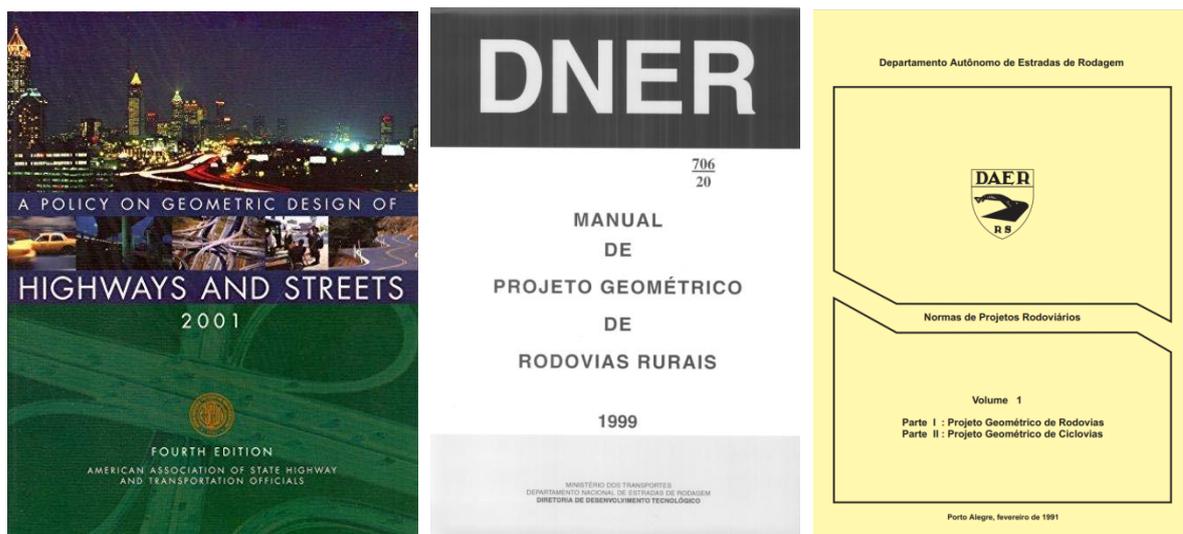
1.2. NORMAS PARA O PROJETO GEOMÉTRICO

A **norma técnica** ou norma padrão é um documento regularizado por um órgão de normalização juntamente com institutos de padronização e comissões técnicas, que visa estabelecer diretrizes, especificações técnicas, exigências ou encargos para um determinado projeto, produto ou processo. Tais normas são desenvolvidas por consensos técnicos e têm por objetivo principal proporcionar segurança, qualidade e eficiência nas áreas que serão aplicadas. Além disso, fornecem orientações e critérios que auxiliam no desenvolvimento de projetos, operações e avaliações de conformidade de produtos e serviços garantindo o adequado uso, confiabilidade e padronização dos mesmos. A norma técnica geralmente reúne o que se chama de “boas práticas”. Ao seguir todos os procedimentos e diretrizes de uma norma específica para uma atividade, o órgão, empresa ou profissional encarregado por ela encontra-se amparado perante quaisquer acidentes e fatalidades que venham a ocorrer e que pudessem estar relacionados com as prescrições técnicas do projeto.

Na engenharia, são diversas as normas técnicas vigentes. Na área de rodovias, existe um pilar de referência no Brasil, que consiste no Manual sobre Projeto Geométrico de Rodovias

Rurais, publicado no ano de 1999 pelo então Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – DNER, atualmente Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT. Tal norma recolhe os princípios desenvolvidos pela norma vigente nos Estados Unidos, “*A Policy on Geometric Design of Highways and Streets*”, publicado pela *American Association of State High and Transportation Officials* (AASHTO). Esta norma também foi empregada como base na formulação da norma própria adotada pelo Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem – DAER, do Rio Grande do Sul, que é de obrigado cumprimento desde 1991 para o projeto das rodovias sob responsabilidade do Estado (Figura 10).

Figura 10: Normas fundamentais de projeto geométrico de rodovias.



Fonte: AASHTO, 2001; BRASIL, 1999; DAER, 1991.

As normas de Projeto Geométrico são uma ferramenta que além de garantir e defender as condições de proteção e conforto para uma melhor utilização das vias, também organiza e rege os parâmetros e especificações adequadas com a intensidade de uso previsto. A norma estabelece tais parâmetros para a geometria de rodovias em função da região e a classe de cada projeto individualmente, como será abordado na seção seguinte.

1.3. PARÂMETROS DE PROJETO DE RODOVIAS

1.3.1. Classificação técnica das rodovias

Cada projeto de rodovia é único e possui suas próprias especificações, e para atender tal demanda, se fez necessário a separação em classes. Essa classificação é um conjunto de condições e diretrizes que devem ser seguidas tanto por quem vai realizar a construção da

rodovia como também por seus usuários. O Manual de Projeto Geométrico do DNIT define 6 classes de rodovias:

- **Classe 0 ou Especial:** também chamada de via expressa, representa o maior padrão técnico adotado. Possui controle total de acessos, projeto em pista dupla com separação física e velocidade elevada. O critério de projeto de rodovias dessa classe é totalmente administrativo, não em função de um nível de tráfego esperado.
- **Classe I:** é a indicada para os maiores valores de tráfego, fora das rodovias classificadas como vias expressas. A classe atende a rodovias com funções de vias arteriais na rede e é subdividida nas classes I-A (pista dupla) e I-B (pista simples):
 - **Classe I-A:** possui condições semelhantes à classe especial, para atender elevadas demandas de tráfego com adequados níveis de serviço, porém mais tolerante a interferências causadas por acessos.
 - **Classe I-B:** é uma via de pista simples de elevado padrão e deve ser adotada para casos em que o volume médio de veículos no seu décimo ano de uso seja superior a 1.400 veículos/dia ou 200 veículos/hora não horário de pico.
- **Classe II:** rodovia em pista simples em que o volume médio diário de veículos (VMD), conforme projetado para o seu décimo ano de uso, esteja entre 700 e 1.400 veículos por dia.
- **Classe III:** projeto de rodovia em pista simples, com VMD mínimo de 300 e máximo de 700 veículos por dia.
- **Classe IV:** rodovia de pista simples, com características técnicas suficientes para o atendimento a custo mínimo ao tráfego previsto no seu primeiro ano. Via geralmente não pavimentada, compreende estradas vicinais e rodovias pioneiras. É dividida em duas subclasses.
 - **Classe IV-A:** possui tráfego médio diário no seu primeiro ano entre 50 e 200 veículos por dia.
 - **Classe IV-B:** possui tráfego médio diário inferior a 50 veículos por dia no seu primeiro ano de uso.

1.3.2. Região

Em função de facilitar a classificação do relevo onde é projetada uma determinada rodovia, a região é classificada em três tipos diferentes:

- **Plana:** região com topografia suave, possui boa visibilidade e permite custos baixos para construção da rodovia.
- **Ondulada:** região com terreno que possui ondulações não muito acentuadas que necessitam de cortes e aterros de média proporção.
- **Montanhosa:** região que possui um terreno com significativas elevações e necessita frequentes cortes e aterros, o que eleva o custo de sua realização.

A definição do tipo de região costuma ser especificada pelo órgão rodoviário responsável pelo projeto da rodovia ou exige de experiência do engenheiro no local de desenvolvimento do projeto. No Rio Grande do Sul é comum seguir os critérios de classificação sugeridos pelo prof. João Fortini Albano, a partir do valor da inclinação da reta de maior declive da área explorada, segundo a Tabela 1, na qual também se informam os valores adotados pelo Departamento de Estradas de Rodagem do Estado do Paraná (DER/PR):

Tabela 1: Critérios de classificação de relevo da região no Rio Grande do Sul e no Paraná.

Região	Intervalo Prof. Albano	Intervalo DER/PR
Plana	$RMD \leq 5\%$	$RMD \leq 10\%$
Ondulada	$5\% < RMD \leq 20\%$	$10\% < RMD \leq 25\%$
Montanhosa	$RMD > 20\%$	$RMD > 25\%$

Fonte: ALBANO, 2009.

1.3.3. Velocidade Diretriz

A velocidade tem participação fundamental na definição da maior parte das características técnicas de uma rodovia. É ela quem condiciona por exemplo a curvatura, distância de visibilidade, inclinação máxima e superelevação de uma via, entre muitos outros parâmetros. A velocidade diretriz, conhecida também como velocidade de projeto, representa a maior velocidade com que pode ser percorrido um trecho viário em condições de segurança e conforto, e não deve ser inferior às velocidades de operação que irão predominar na via projetada. A Tabela 2 apresenta os limites de velocidades e diretrizes para projetos definidos pelo Manual de Projeto Geométrico.

Tabela 2: Velocidades diretrizes para projetos de rodovias.

Classe de Projeto	Velocidades diretrizes para projetos rodoviários (km/h)		
	Relevo		
	Plano	Ondulado	Montanhoso
Classe 0	120	100	80
Classe I	100	80	60
Classe II	100	70	50
Classe III	80	60	40
Classe IV	80 - 60	60 - 40	40 - 30

Fonte: DNER, 1999, página 42

1.3.4. Veículo de Projeto

O dimensionamento geométrico e estrutural de uma rodovia também é influenciado pelas características físicas dos veículos e a proporção entre eles. A largura do veículo por exemplo influencia a largura da pista de rolamento, de acostamento e dos ramos a serem projetados. A distância entre os eixos também influi no cálculo da superlargura das pistas principais e na determinação da largura e dos raios mínimos das pistas dos ramos. Conseqüentemente, para fins de projeto, é necessário examinar os tipos de veículos que irão circular pela rodovia, estabelecendo a representatividade da proporção de cada classe e assim selecionar o tipo mais indicado para definir os parâmetros de projeto.

Com a ausência de estudos mais específicos que poderiam permitir fixar com precisão as dimensões e características de veículos de projeto em território nacional, são recomendadas as classificações usadas pela AASHTO, modificando apenas sua designação. Essa classificação separa os veículos de projeto em quatro tipos básicos, que devem ser adotados conforme características prevalecentes do tráfego:

- **VP:** são os veículos leves, assimiláveis à automóveis incluindo vans, utilitários, pickups e similares.
- **CO:** são os veículos comerciais rígidos e não articulados, como por exemplo caminhões e ônibus convencionais, normalmente de dois eixos e seis rodas.

- **O:** são os veículos comerciais rígidos de maiores dimensões. Incluem-se nessa categoria ônibus de longo percurso e de turismo e caminhões longos frequentemente com três eixos.
- **SR:** são os veículos comerciais articulados, compostos de uma unidade tratora simples e um semi-reboque.

O veículo de projeto geralmente utilizado no projeto geométrico é o **veículo de carga ou CO**, por apresentar maiores restrições as condicionantes do projeto sem elevar os custos de construção de forma desnecessária. A Tabela 3 resume as principais dimensões básicas de veículos de projeto recomendados para uso em projetos de rodovias.

Tabela 3: Classificação das dimensões dos veículos de carga para projeto de rodovias

Denominação	Dimensões (m)	Desenho
Simplex	2,6 x 14,0 x 4,4m	
Articulados	2,6 x 18,15 x 4,4m	
Reboques	2,6 x 19,8 x 4,4m	

Fonte: ALBANO, 2009.

2. ESTUDO DE TRAÇADO

O estudo de traçado de uma rodovia é uma das etapas fundamentais do projeto e planejamento viário. Esse estudo tem por objetivo analisar detalhadamente o terreno, as condições topográficas e os parâmetros técnicos para assim delimitar os locais mais adequados para a passagem de uma rodovia, que ofereçam uma combinação ideal de eficiência, segurança, conforto e custo, dentro das especificações e limitações técnicas, operacionais, ambientais e orçamentárias existentes.

No final do estudo de traçado, são apresentadas as opções analisadas, com suas respectivas vantagens e desvantagens. Com base nessa análise, é selecionado o traçado mais adequado, que servirá como eixo para o desenvolvimento do projeto executivo da rodovia, ou seja, a definição da linha que constitui o projeto geométrico da rodovia em planta e perfil. Portanto, o estudo de traçado ocorre em fase preliminar, antecede à execução do projeto geométrico.

Os estudos de traçado formam parte dos diferentes estudos e projetos desenvolvidos para a definição completa de uma rodovia em etapa, que possibilitem posteriormente sua construção. A seguir se apresentam as etapas no processo de planejamento de um projeto rodoviário e os documentos relacionados.

2.1. ETAPAS DO PLANEJAMENTO DE UMA RODOVIA

2.1.1. Estudos de Campo

Essa etapa envolve a realização de análises e estudos preliminares para o estudo de traçado de uma rodovia, como estudos de tráfego, análises de impacto ambiental, estudos de drenagem, entre outros. São levados em consideração fatores como a demanda de tráfego, impactos socioambientais, restrições legais e normativas, e outras questões relevantes para o projeto. Os principais estudos de campo realizados são:

- **Estudo de tráfego:** consiste na análise sistemática que abrange a coleta, análise e interpretação de dados relacionados ao fluxo de veículos, pedestres e outras formas de transporte em uma determinada área ou via.

- **Estudo topográfico:** é um levantamento detalhado do local onde a rodovia será construída. Isso envolve a coleta de dados sobre as características do terreno, como elevações, curvas de nível, rios, vegetação, obstáculos naturais, entre outros.
- **Estudo hidrológico:** consiste na coleta de informações e dados sobre precipitação, escoamento superficial, drenagem natural, cotas de cheia máxima e travessia d'água com o objetivo de identificar e dimensionar adequadamente os sistemas de drenagem.
- **Estudo geológico e geotécnico:** realizado pela coleta de dados sobre a composição do solo, a presença de rochas e a estabilidade do terreno, com o objetivo de identificar os possíveis desafios geotécnicos, como instabilidade de encostas, solos problemáticos ou condições de fundação inadequadas.
- **Estudo de impacto ambiental (EIA):** é realizado como parte do processo de licenciamento ambiental com objetivo de prever e analisar os efeitos de impactos ambientais consideráveis do projeto. Envolve a coleta de dados, a realização de análises técnicas e a elaboração de relatórios que descrevem esses impactos e suas medidas específicas de recuperação e proteção.

2.1.2. Anteprojeto

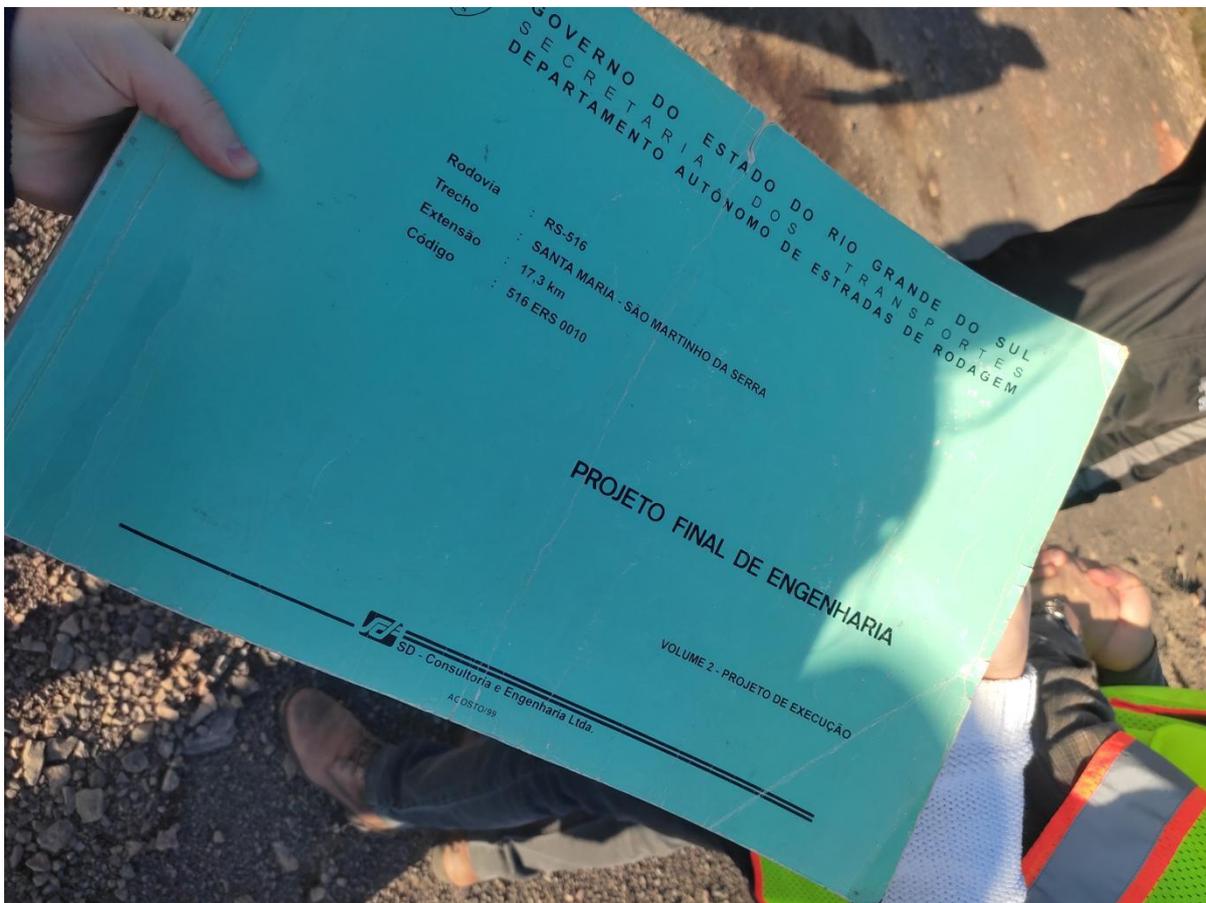
Com base nos dados coletados durante a etapa de estudos de campo, é elaborado um anteprojeto, que recolhe os estudos de traçado, ou seja, as diferentes alternativas testadas e as características da alternativa escolhida. Nessa fase, são definidos o alinhamento horizontal da rodovia, a posição das curvas e a distribuição preliminar de terraplenagem. Além disso, o anteprojeto analisa a viabilidade técnica, econômica e ambiental da rodovia. É importante ressaltar que essa fase é uma primeira versão do projeto, sujeita a ajustes e refinamentos posteriormente, após os apontamentos recebidos em audiências públicas com a população e a partir de estudos mais detalhados.

2.1.3. Projeto final

Com base nos resultados dos estudos de campo, nas diretrizes estabelecidas durante a etapa de anteprojeto e as modificações realizadas na sequência, é desenvolvido o projeto final da rodovia (Figura 11). Nessa etapa, são definidos os detalhes do alinhamento horizontal e vertical da rodovia, bem como todos os elementos de infraestrutura necessários, como

geometria de curvas, perfis longitudinais e transversais, sinalização, drenagem, pontes, viadutos, entre outros.

Figura 11: Projeto final.



Fonte: Autores.

O projeto final é uma versão completa e detalhada do projeto geométrico da rodovia, pronto para ser utilizado na fase de execução da obra e constitui-se das seguintes partes:

- **Projeto geométrico:** é o documento que recolhe os resultados do processo de planejamento e dimensionamento dos elementos físicos e geométricos de uma estrada, incluindo o alinhamento horizontal e vertical, raios de curvas, tangentes, declividades, as faixas de rolamento, as interseções, as rampas e as distâncias de visibilidade dentro dos padrões e normas de conforto e segurança.
- **Projeto de terraplenagem:** consiste no planejamento da movimentação de terra necessária para a construção ou conformação de uma estrada. Abrange o cálculo e a definição dos volumes de corte e aterro ao longo do traçado.
- **Projeto de drenagem:** é o projeto de cálculo e dimensionamento dos sistemas de drenagem que serão necessários para a coleta, condução e escoamento das águas

pluviais ao longo da rodovia. Inclui o detalhamento das obras de arte corrente ou que se repetem no projeto com fins de drenagem do corpo estradal.

- **Projeto de pavimentação:** constitui-se do dimensionamento dos elementos relacionados à superfície de rolamento da estrada, incluindo a seleção dos materiais apropriados, como base, sub-base e revestimento asfáltico ou de concreto.
- **Projeto de sinalização:** é o planejamento e a definição das placas de sinalização vertical, como placas de regulamentação, advertência e indicação, bem como a marcação viária, como faixas de tráfego, linhas de divisão e setas direcionais que serão instaladas ao longo da rodovia, além dos dispositivos auxiliares.
- **Projeto de interseções:** consiste na definição dos detalhes dos pontos de encontro entre a rodovia principal e outras vias, como acessos, cruzamentos e rotatórias.
- **Relatório de impacto ambiental (RIMA):** é um documento técnico que apresenta as informações e análises sobre os impactos ambientais decorrentes da construção e operação da rodovia. Apresenta os resultados dos estudos prévios de impacto ambiental.
- **Projeto de obras especiais:** é o planejamento de pontes, viadutos, túneis, passarelas, galerias e outros elementos específicos que serão necessários ao longo da rodovia para permitir a transposição de obstáculos naturais, ferrovias ou outras vias.
- **Projeto de obras complementares:** planejamento e dimensionamento de acostamentos, passeios, iluminação, drenagem pluvial, dispositivos de segurança, entre outros.
- **Especificações executivas:** é o documento que abrange as características de materiais, métodos construtivos, dimensionamentos, detalhamentos de elementos estruturais, critérios de qualidade e segurança de uma rodovia
- **Cronograma:** consiste no planejamento das atividades e marcos importantes ao longo do processo de estudo, projeto, construção e finalização de uma obra rodoviária, que permitem estimar o prazo das diferentes etapas projetadas.
- **Custos e orçamento:** projeto que envolve a análise e planejamento dos custos diretos e indiretos ligados a cada etapa do projeto, como desapropriações, aquisição de terrenos, estudos técnicos, materiais, mão de obra e serviços construtivos. Logo é realizado o orçamento com o objetivo de alocar esses recursos para cada uma dessas atividades.

2.1.4. Projeto As-Built

O Projeto *As-Built*, conhecido como projeto conforme construído, é uma representação técnica que documenta e registra as características reais e finais de uma obra após sua conclusão. Ele é elaborado com base nas modificações e alterações realizadas durante o processo de construção, refletindo as condições reais da rodovia que foi executada. O Projeto *As-Built* deve representar fielmente a obra construída, além de fornecer informações precisas e atualizadas sobre a infraestrutura existente, sendo utilizado para fins de manutenção, gerenciamento e registro para futuras referências.

2.2. ETAPAS DO ESTUDO DO TRAÇADO

Um estudo de traçado para o projeto geométrico de uma rodovia demanda várias etapas de estudos prévios para a determinação do alinhamento horizontal e vertical da estrada.

2.2.1. Reconhecimento

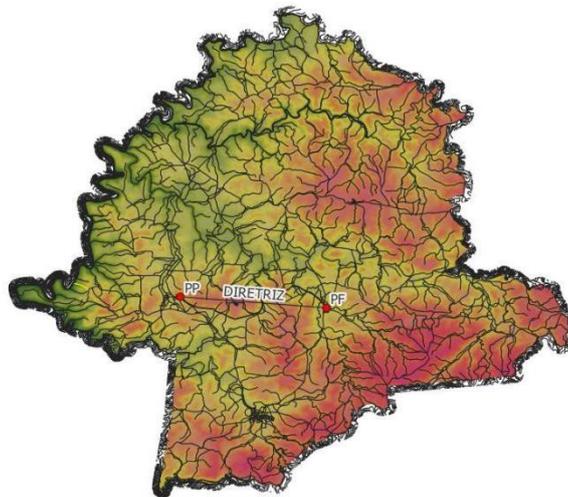
Nessa primeira etapa ocorre uma avaliação preliminar da área onde a rodovia será projetada (Figura 12). São realizados estudos primários bem como visitas ao local para obter informações sobre as características gerais do terreno, obstáculos naturais, condições geológicas, hidrografia, propriedades existentes e outros elementos relevantes a fim de orientar o posicionamento da rodovia. É durante essa etapa que são definidos alguns elementos importantes de projeto, como os seguintes:

- **Ponto de partida:** é o ponto onde inicia a rodovia, geralmente relacionado a um ponto de referência definido. Ele marca o começo da via e é a partir desse ponto que as opções do traçado serão exploradas. O ponto de partida (PP) é de suma importância para estabelecer a continuidade e a coerência do projeto geométrico, assim como marcar o sentido da rodovia projetada.
- **Ponto final:** é o ponto onde a rodovia termina, normalmente se conectando a outra via existente. É essa localização que o projeto do traçado precisa levar em consideração para garantir a conexão adequada com outras rodovias e acessos importantes. O ponto final (PF) é crucial para determinar o término do projeto geométrico e deve ser levado em conta na definição das opções de traçado.
- **Pontos obrigatórios de condição:** são pontos ao longo da rodovia onde se encontram condições ou restrições específicas que devem ser atingidas ou evitadas durante o

projeto. Essas condições podem ser de ordem social, econômica ou estratégica, tais como a existência de cidades, vilas, instalações industriais ou militares, terminais de transporte, áreas de produção agrícola, entre outras.

- **Pontos obrigatórios de passagem:** são pontos ao longo da rodovia que devem ser alcançados ou evitados por razões de ordem técnica, seja por características do relevo, da geologia da região (solos inadequados ou jazidas úteis para o projeto de terraplenagem), de drenagem, de preservação ambiental, etc.
- **Diretriz geral:** é a reta que liga os pontos extremos da estrada, representando a solução de menor distância para realizar a ligação entre o ponto de partida e o ponto final do traçado.
- **Diretriz parcial:** é cada um dos alinhamentos retos que ligam dois pontos obrigatórios ou favoráveis intermediários.

Figura 12: Estudos primários de planejamento de traçado de rodovias.

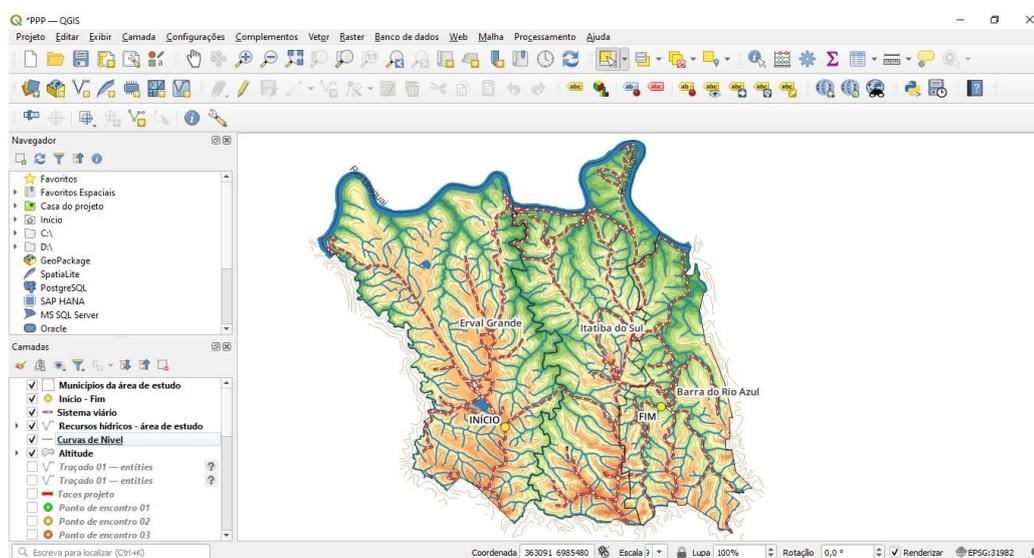


Fonte: Autores.

A complexidade e detalhamento dos estudos de campo, para a etapa de reconhecimento, se vale da existência e da qualidade das informações disponíveis sobre a região onde será construída a rodovia. Essa fase de estudo pode ser realizada através de cartas do Serviço Geográfico do Exército, onde, nesses casos, é possível iniciar os estudos preliminares de lançamento das alternativas de traçados com base nos mapas e cartas topográficas disponíveis. Porém, estudar apenas essas cartas não é suficiente para selecionar a melhor alternativa de traçado, sendo necessário realizar visitas de campo e percorrer diferentes diretrizes pré-selecionadas, a fim de determinar qual é a mais adequada.

Atualmente, a etapa de reconhecimento pode ser realizada também através de softwares GIS (*Geographic Information Systems*). Esses sistemas computacionais permitem a aquisição, organização, análise e visualização de dados geográficos. São projetados para trabalhar com informações espaciais, como mapas, imagens de satélite, dados topográficos e outras camadas de informação georreferenciada. No estudo do traçado geométrico de rodovias, o software GIS, conforme ilustra Figura 13, desempenha um papel fundamental fornecendo ferramentas e recursos para a análise e o geoprocessamento de dados, permitindo uma abordagem mais precisa na definição do traçado da rodovia. O uso de tais softwares possibilita o acesso a uma ampla gama de informações geográficas e a avançados recursos para análise do terreno, bem como a criação e a simulação de diferentes alternativas de traçado da rodovia, levando em consideração fatores como curvas, declividade, acessos e interseções.

Figura 13: Software QGIS.



Fonte: Autores.

2.2.2. Exploração

Após o reconhecimento, é realizada uma segunda etapa de estudos mais detalhados, visando obter todos os elementos necessários para a elaboração do projeto inicial da rodovia. Durante a fase de exploração são conduzidas análises e investigações aprofundadas, permitindo uma compreensão mais precisa do terreno e das condições locais. Isso inclui levantamentos topográficos, estudos geotécnicos, análise de drenagem, avaliação de impactos ambientais, entre outros. Essa exploração minuciosa fornece informações cruciais para a concepção do projeto, garantindo sua viabilidade e segurança.

2.3. ESCOLAS DE TRAÇADO

A escolas de traçado rodoviário marcam os princípios utilizados para a definição das alternativas de traçado para uma determinada estrada. Existem duas escolas principais, denominadas clássica e moderna (Figura 14). Por um lado, a escola clássica enfatiza a harmonia estética e a suavidade das estradas, priorizando trajetos retos. No entanto, a escola moderna de traçado valoriza a eficiência, segurança e adaptação às condições naturais, introduzindo curvas mais suaves e otimizando a via para o tráfego, resultando em maior segurança e fluidez, embora em excesso possa prejudicar a ultrapassagem.

Figura 14: Escolas clássica e moderna de traçado de rodovias.



Fonte: HIPPOPX (Disponível em: <<https://www.hippopx.com/pt/roads-endless-road-america-road-asphalt-desert-highway-211465>>. Acesso em: 08 de ago de 2023) e PXFUEL (Disponível em: <<https://www.pxfuel.com/pt/free-photo-ikhou>>. Acesso em: 08 de ago de 2023).

2.3.1. Escola clássica

A escola clássica de planejamento rodoviário refere-se a um conjunto de princípios e técnicas desenvolvidos no início do século XX para planejar e projetar estradas. Os projetos da escola clássica de traçado viário tinham como principal base a alta relação entre a potência e o peso dos veículos a motor de combustão que inicialmente foram desenvolvidos. Além disso, as

distâncias que eram projetadas ainda eram de menores dimensões, assim como o tráfego ao qual davam serviço ainda era bastante reduzido.

Esta escola valorizou traçados de estradas retas, evitando curvas fechadas e declives acentuados, o que proporcionou uma experiência de condução mais suave e direta, sobretudo em regiões planas ou com poucas restrições de relevo. Porém, ao longo dos anos, com o avanço da engenharia rodoviária, foi observado que esse estilo levava o condutor ao estado de sonolência, o ofuscamento da visão à noite, um maior custo de construção além de facilitar o excesso de velocidade na pista.

2.3.2. Escola moderna

A escola moderna de traçado é uma abordagem centrada na eficiência, segurança e capacidade rodoviária, tendo em conta fatores como topografia, fluxo de tráfego, acessibilidade e impacto ambiental. Visa a eliminação das tangentes em planta por curvas de raio maior e propõe uma adaptação da via ao terreno original, solucionando problemas como o de visibilidade. Essa abordagem faz uso de técnicas de engenharia de tráfego e modelagem de fluxo para determinar a melhor configuração da estrada, chegando ao denominado “traçado fluente”.

A curva horizontal, elemento fundamental nesse estilo de projeto, traz diversos benefícios para a segurança, fluidez e eficiência do tráfego. Entre eles podem-se citar: redução de velocidades excessivas, melhor fluidez do fluxo, melhoria na visibilidade e redução da monotonia, assim como redução do custo graças à melhor adaptação da rodovia ao terreno. Porém, o exagero de curvas acaba prejudicando o processo de ultrapassagem e aumenta a extensão total da rodovia.

2.4. CONDICIONANTES DE TRAÇADO

As condicionantes de traçado de uma rodovia são os agentes e restrições que influenciam a definição, a geometria e o alinhamento de uma rodovia. Essas condicionantes podem ser de natureza técnica, ambiental, social, econômica ou regulatória, e devem ser consideradas durante o processo de estudo do traçado. Algumas das principais condicionantes de traçado rodoviário são apresentadas nesta seção.

2.4.1. Relevo

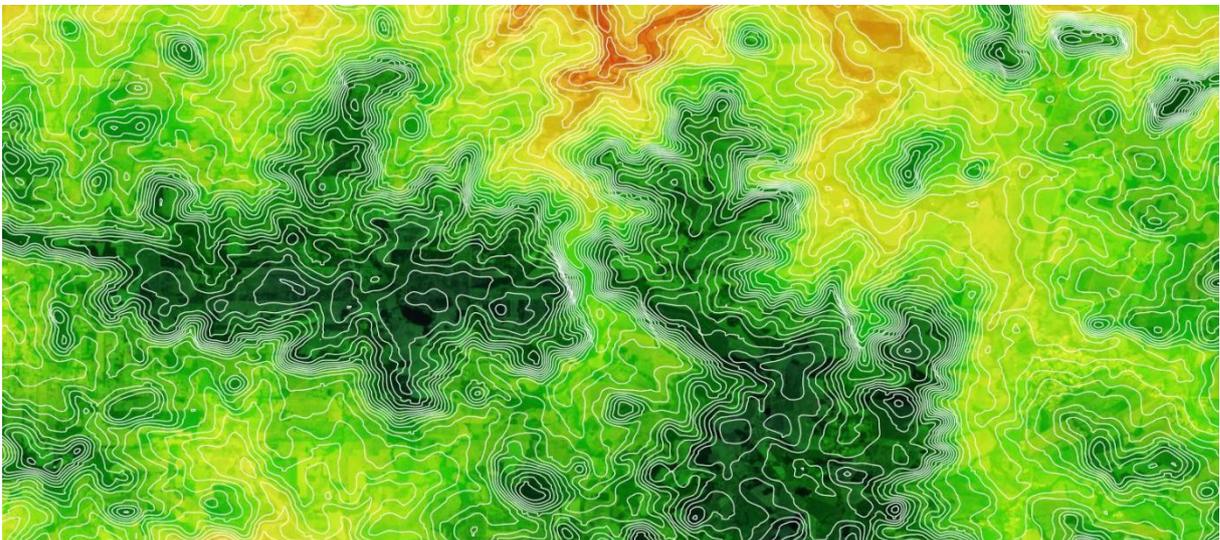
É de suma importância que um bom projeto rodoviário possua um estudo específico de relevo. Esse estudo desempenha uma parte fundamental no planejamento, projeto e dimensionamento de uma rodovia. Compreender as múltiplas características e alternâncias do terreno é essencial para a garantia de construção de rodovias eficientes.

2.4.1.1. Representação de relevo

Duas ferramentas que exercem um papel importante na representação do relevo são as curvas de nível e os sistemas de projeção. As **curvas de nível** conectam pontos de mesma altitude em um mapa topográfico por meio de linhas. Elas fornecem informações úteis sobre a inclinação e o formato do terreno, permitindo identificar áreas de maior declividade, cumes, vales e outras características relevantes. Ao analisar as curvas de nível, os engenheiros responsáveis pela execução do projeto podem determinar o traçado mais adequado para a rodovia, escolher o alinhamento que minimize cortes e aterros excessivos e evitar áreas instáveis ou sujeitas a deslizamentos de terra. Isso ajuda a garantir a estabilidade da estrada, reduzir os riscos de acidentes e minimizar os custos de construção.

As Figuras 15, 16 e 17 mostram diferentes formas de representar as curvas de nível, favorecendo uma melhor visualização dos acidentes topográficos e condicionantes do relevo para a definição da rodovia, como pode ser mediante cores.

Figura 15: Representação de curvas de nível em software GIS (“mapa de calor”)



Fonte: Autores.

Figura 16: Representação plana de curvas de nível (mapa - 2D)



Fonte: Autores.

Figura 17: Representação volumétrica de curvas de nível (maquete - 3D)



Fonte: Autores.

Os **sistemas de projeção**, por sua vez, são utilizados para representar a superfície terrestre em um plano bidimensional, como um mapa ou um modelo digital de terreno (Figura 16). A escolha do sistema de projeção adequado dentre os mais diversos existentes é fundamental para obter uma representação precisa e confiável do relevo em um determinado local. O sistema de projeção escolhido influencia a escala, a precisão e a distorção das medidas, bem como a interpretação e análise dos dados topográficos.

Ademais, os sistemas de projeção integram dados geográficos de diferentes fontes e permitem a interoperabilidade entre sistemas de informações geográficas, facilitando assim a sobreposição de camadas de informações, como curvas de nível, imagens de satélite, redes de drenagem e outros elementos relevantes para o estudo de traçado. Isso permite uma análise mais completa e integrada do terreno, contribuindo para uma tomada de decisão mais correta e precisa.

Nesse processo tomam parte importante as atividades de georreferenciamento, mediante o uso de tecnologias geoespaciais, como o sistema de posicionamento global (GPS) e sistemas de informações geográficas (GIS), para atribuir uma localização específica a elementos ou eventos em um determinado ponto da superfície terrestre (Figura 15). Fundamental para a obtenção de dados precisos sobre a localização e o terreno, esse processo permite um melhor planejamento e um projeto e execução mais exatos de obras viárias, contribuindo também para o monitoramento, manutenção e gestão eficiente de rodovias.

Um georreferenciamento bem feito da área a ser utilizada para construção de uma rodovia implica em um projeto e planejamento preciso, onde os responsáveis pela obra podem tomar decisões com base nas informações geográficas, como o traçado mais adequado para a via, considerando fatores como topografia, hidrologia e impactos ambientais assim resultando em estradas mais eficientes e seguras, diminuindo drasticamente problemas futuros de engenharia.

2.4.1.2. Elementos condicionantes de relevo

Esta seção apresenta as principais condicionantes de relevo utilizadas no estudo de traçado:

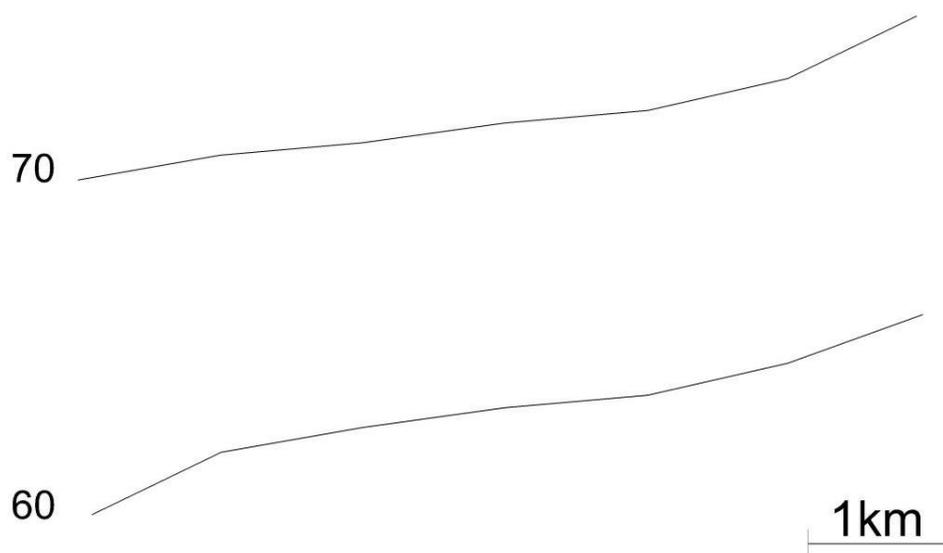
- **Planícies:** são áreas de terreno plano ou levemente inclinado, geralmente localizadas em baixas altitudes próximas ao nível do mar (Figuras 18 e 19).

Figura 18: Planície.



Fonte: PXFUEL (Disponível em: <<https://www.pxfuel.com/pt/free-photo-xzucv>>. Acesso em: 14 de jun de 2023).

Figura 19: Planície em representação de curvas de nível.



Fonte: Autores.

- **Planalto:** são áreas elevadas e relativamente planas, situadas em grandes altitudes, ao contrário das planícies. Os planaltos possuem uma superfície irregular com colinas e depressões de pouca declividade (Figuras 20 e 21).

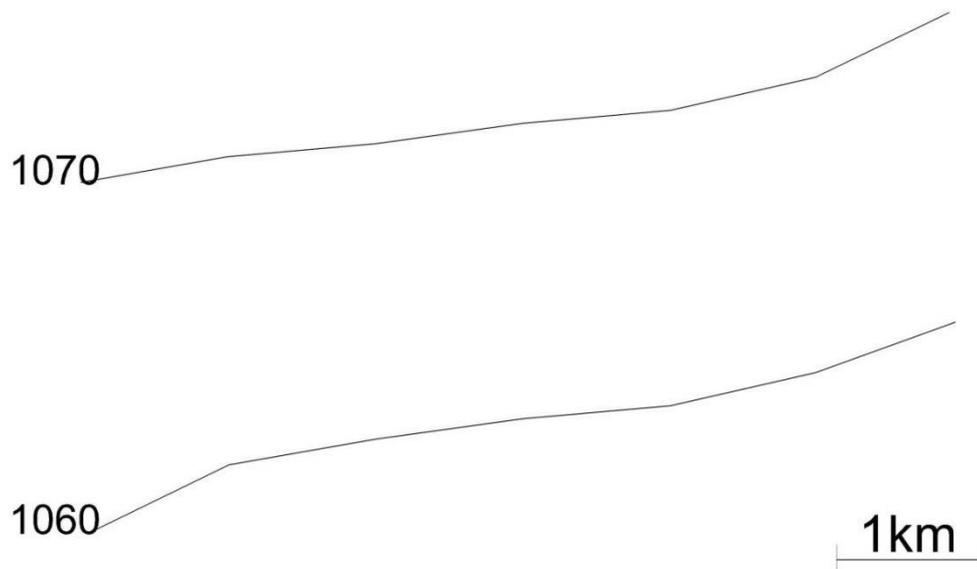
Figura 20: Planalto.



Fonte: WIKIMEDIA Commons (Disponível em:

<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:A_melhor_hora_para_visitar_o_morro_%C3%A9_ao_entardecer.JPG>. Acesso em: 13 de set de 2023).

Figura 21: Planalto em representação de curvas de nível.



Fonte: Autores.

- **Serras:** forma de relevo de terreno acidentado, caracterizada por uma cadeia de montanhas ou colinas íngremes e estreitas, geralmente com picos afiados e vales profundos entre eles (Figura 22).

Figura 22: Serras.



Fonte: WIKIMEDIA Commons (Disponível em:

<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Serra_do_Rio_do_Rastro_Germano_Sch%C3%BC%C3%BCr_06.jpg>. Acesso em: 14 de jun de 2023).

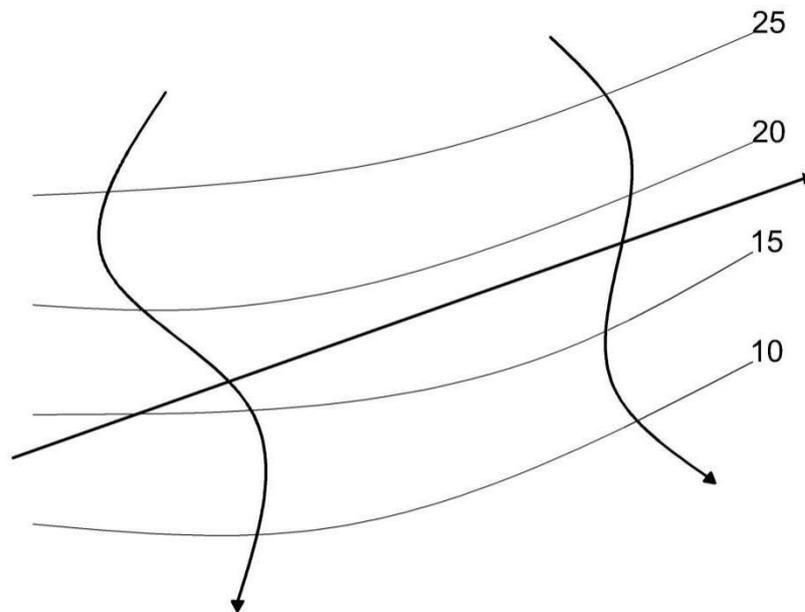
- **Encostas:** é a superfície entre as áreas mais altas e as mais baixas do relevo. São declives ou inclinações de terrenos, geralmente associadas a montanhas ou colinas. As águas da chuva escoam sobre elas (Figuras 23 e 24).

Figura 23: Encostas



Fonte: PXHERE (Disponível em: <<https://pxhere.com/pt/photo/106655>>. Acesso em: 08 ago de 2023).

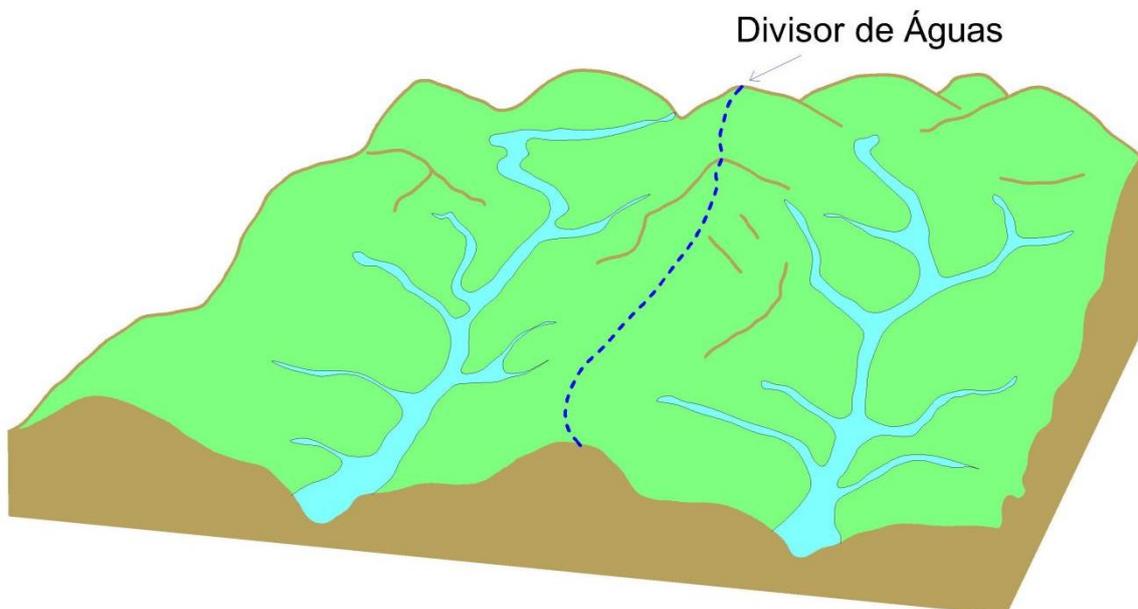
Figura 24: Encostas em representação de curvas de nível



Fonte: Autores.

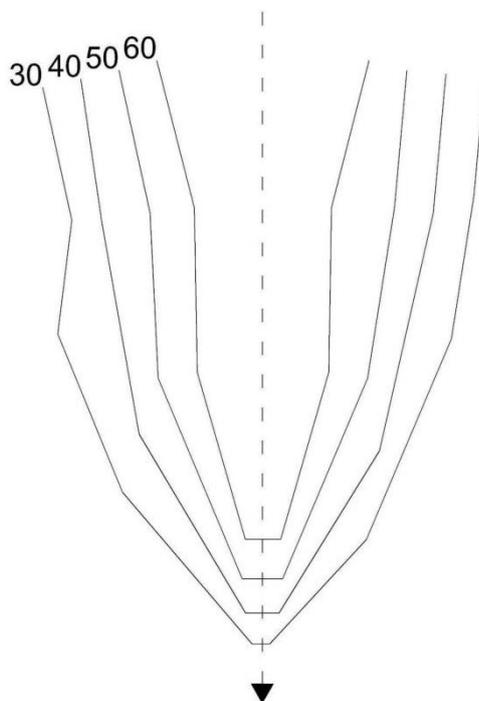
- **Divisor de águas:** é o encontro do ponto mais elevado de duas encostas que delimita as bacias hidrográficas. Demarcam os limites entre as áreas em que as águas escoam para diferentes cursos d'água, geralmente separando diferentes sistemas de drenagem (Figuras 25 e 26).

Figura 25: Divisor de águas.



Fonte: Autores.

Figura 26: Divisor de águas em representação de curvas de nível.



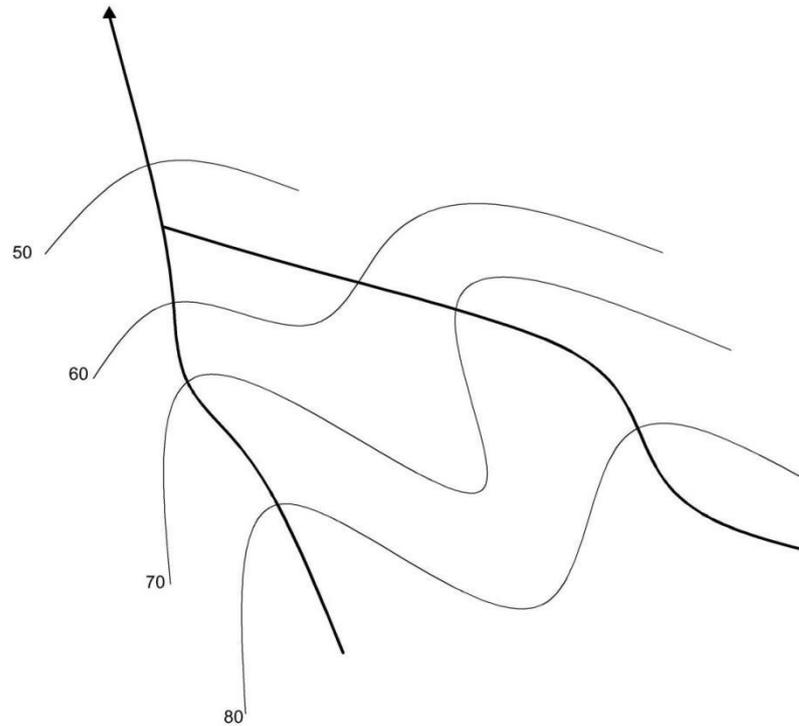
Fonte: Autores.

- **Vale:** é uma depressão alongada e estreita na superfície terrestre formada por duas encostas opostas (Figuras 27 e 28).

Figura 27: Vale.

Fonte: PXHERE (Disponível em: <<https://pxhere.com/pt/photo/1207181>>. Acesso em: 08 ago de 2023).

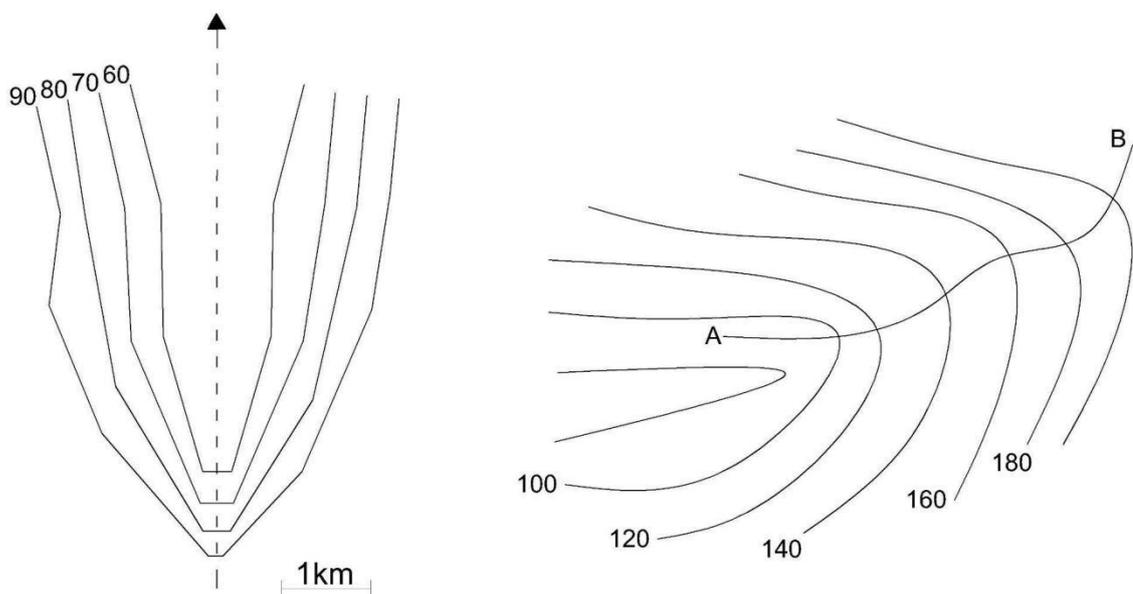
Figura 28: Vale em representação de curvas de nível.



Fonte: Autores.

- **Talwegues:** são vales profundos e estreitos que servem de caminho para os rios. São caracterizados por suas encostas íngremes e, em grande parte, exibem formato em “V”. A área em torno dos talwegues é chamada de mata ciliar (Figura 29).

Figura 29: Talwegues em representação de curvas de nível.



Fonte: Autores.

- **Contrafortes:** são escarpas íngremes ou elevações abruptas nas encostas de montanhas ou cadeias montanhosas. Localizam-se na maioria das vezes nas bordas das grandes cadeias montanhosas (Figuras 30 e 31).

Figura 30: Contraforte.

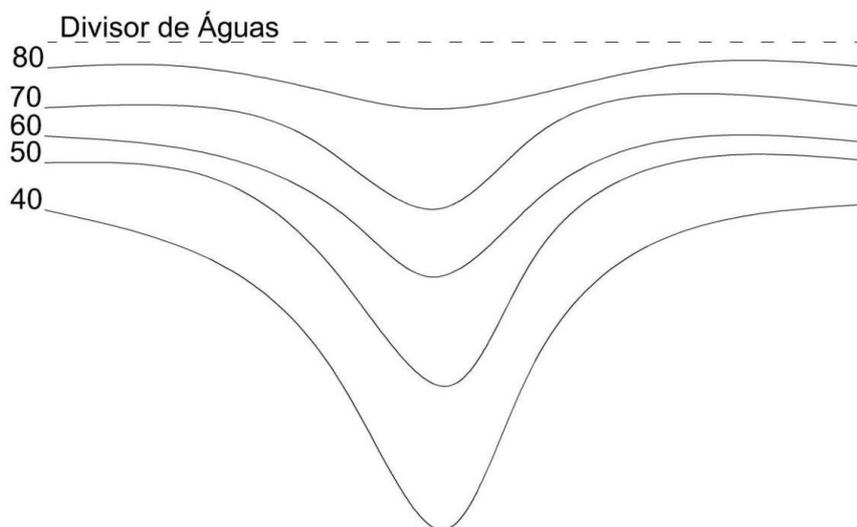


Fonte: ESCALADAS. Disponível em:

<<https://www.escaladas.com.br/local/id/1006/Contraforte%20do%20M%C3%A3e%20D%27%C3%81gua>>.

Acesso em: 08 ago. 2023.

Figura 31: Contraforte em representação de curvas de nível.



Fonte: Autores.

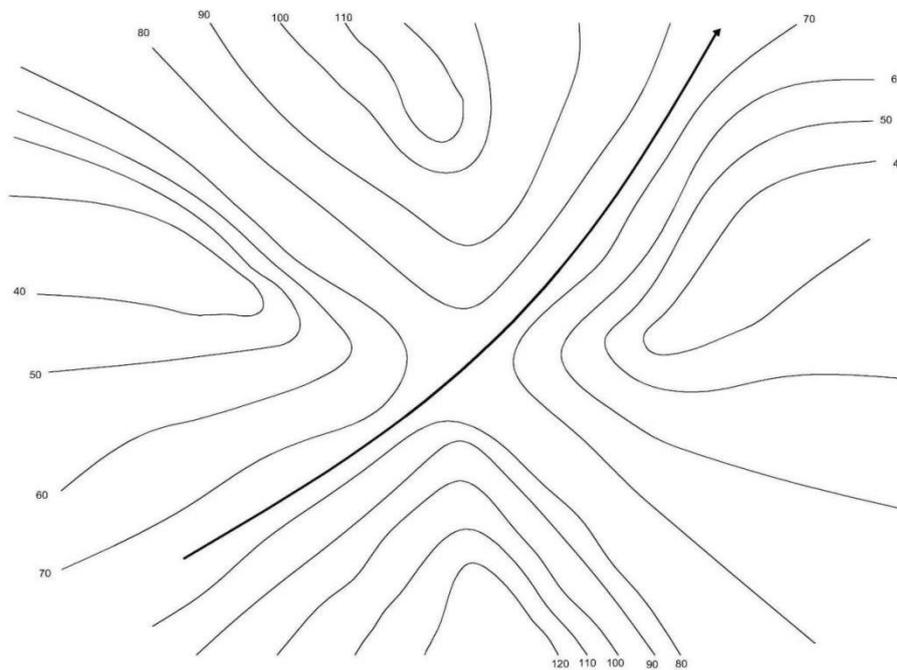
- **Gargantas:** são depressões acentuadas do divisor de águas de uma montanha ou serra (Figuras 32 e 33).

Figura 32: Garganta.



Fonte: PXHERE (Disponível em: <<https://pxhere.com/pt/photo/1540681>>. Acesso em: 08 ago de 2023).

Figura 33: Garganta em representação de curvas de nível.



Fonte: Autores.

2.4.2. Outras condicionantes de traçado

As demais condicionantes que devem ser consideradas são as derivadas das características geológicas, hidrológicas, de uso do solo e ambientais do terreno:

- No **aspecto geológico**, é fundamental analisar as características do subsolo, como a composição do solo, a presença de rochas ou camadas de solo instáveis, e a ocorrência de fenômenos geológicos que possam afetar a estabilidade da via. Além disso, é interessante localizar a existência de camadas geológicas com boas características geotécnicas para uso nas camadas de terraplenagem da rodovia, sendo possíveis locais para jazidas ou locais de empréstimo de material.
- As **condições hidrológicas** englobam a análise do sistema de drenagem da região, incluindo rios, córregos e a disponibilidade de água. É necessário avaliar o escoamento das águas pluviais, prevenir a ocorrência de alagamentos e garantir a correta drenagem da via com o adequado dimensionamento dos dispositivos de transposição de talwegues e de condução das águas subterrâneas e superficiais que afetam à rodovia.
- No que diz respeito ao **uso do solo**, é importante considerar as atividades e ocupações presentes na área adjacente à via. Isso inclui a presença de propriedades agrícolas, áreas urbanizadas, zonas de atividade industrial, residências, unidades de conservação patrimonial ou arqueológica ou outras atividades que possam impactar a circulação e a segurança na estrada ou encarecer os custos de desapropriação ou indenização necessários para a construção da infraestrutura.
- Por fim, as **questões ambientais** envolvem a proteção e preservação dos recursos naturais presentes na região. Deve-se considerar a existência de áreas sensíveis, como reservas naturais, habitats de espécies protegidas, cursos d'água ou áreas de preservação ambiental. Medidas adequadas devem ser tomadas para minimizar os impactos ambientais durante a construção e operação da via.

3. PLANIMETRIA

A planimetria se concentra na representação e análise dos elementos em projeção horizontal do traçado da rodovia. Envolve o desenho e o dimensionamento das curvas, tangentes, alinhamentos, interseções e outros elementos que compõem a geometria em planta baixa da rodovia.

A definição do projeto planimétrico da rodovia parte da escolha da diretriz do traçado procedente do estudo de traçado. Tal diretriz, formada pela conjunção das diferentes diretrizes parciais, adota inicialmente a representação geométrica de uma poligonal aberta, na qual serão inseridas na sequência as correspondentes curvas que propiciem as mudanças de direção na rodovia. Esses conceitos e a forma de cálculo dos mesmos serão abordados neste capítulo.

3.1. POLIGONAL ABERTA

3.1.1. Definições e cálculos dos elementos

A poligonal aberta é utilizada para representar a diretriz do traçado da rodovia, descrevendo a sequência de alinhamentos ao longo dela. É caracterizada pelos seguintes elementos:

- Coordenadas dos vértices.
- Projeção dos alinhamentos.
- Comprimento dos alinhamentos.
- Rumo dos alinhamentos.
- Azimute dos alinhamentos.
- Deflexões entre os alinhamentos.

3.1.1.1. Coordenadas dos vértices

Os vértices dos alinhamentos conformam os pontos de inflexão (PIs), onde a direção de um alinhamento muda de uma direção para outra. As coordenadas geográficas x e y desses vértices, referenciadas segundo os eixos definidos pela Linha do Equador (abscissas) e pelo Meridiano de Greenwich (ordenadas), são obtidas por meio de cartas geográficas ou utilizando softwares GIS com apoio de CAD (*Computer Aided Design*). Já a coordenada z é relativa à cota

do ponto, medida sobre o nível do mar. Os vértices são localizados no terreno, referenciado em um sistema reticulado ortogonal, no qual os nós representam pontos com coordenadas conhecidas, representados pelos valores x e y em relação aos eixos do sistema. Já a coordenada z , em virtude de ser utilizado um sistema de projeções cotadas, se representa pelo seu valor, relacionado às curvas de nível do terreno.

As escalas comumente utilizadas para a representação da planimetria são de 1:2.000 ou 1:5.000 (no CAD, utiliza-se a escala 1:1). A leitura, interpretação e compreensão dos elementos presentes na carta devem ser realizadas com cautela e discernimento máximo, assim como a localização dos vértices. Para os valores das coordenadas, adota-se normalmente uma precisão de três casas decimais, correspondendo a milímetros.

3.1.1.2. Projeções dos alinhamentos

De acordo com a representação planimétrica da rodovia em planta no sistema de coordenadas cartesiano indicado anteriormente, o eixo X tem orientação de Oeste (O ou W) para Leste (L ou E), enquanto o eixo Y tem orientação de Sul (S) para Norte (N). As projeções de um alinhamento podem ser obtidas calculando a diferença entre as coordenadas do vértice final e do vértice inicial do mesmo, segundo o sentido definido para o traçado (do ponto de partida – PP, para o ponto final – PF) (Figura 34):

$$\Delta x = x_1 - x_0 \quad (1)$$

$$\Delta y = y_1 - y_0 \quad (2)$$

Onde:

Δx e Δy = projeções no eixo X e Y, respectivamente (m).

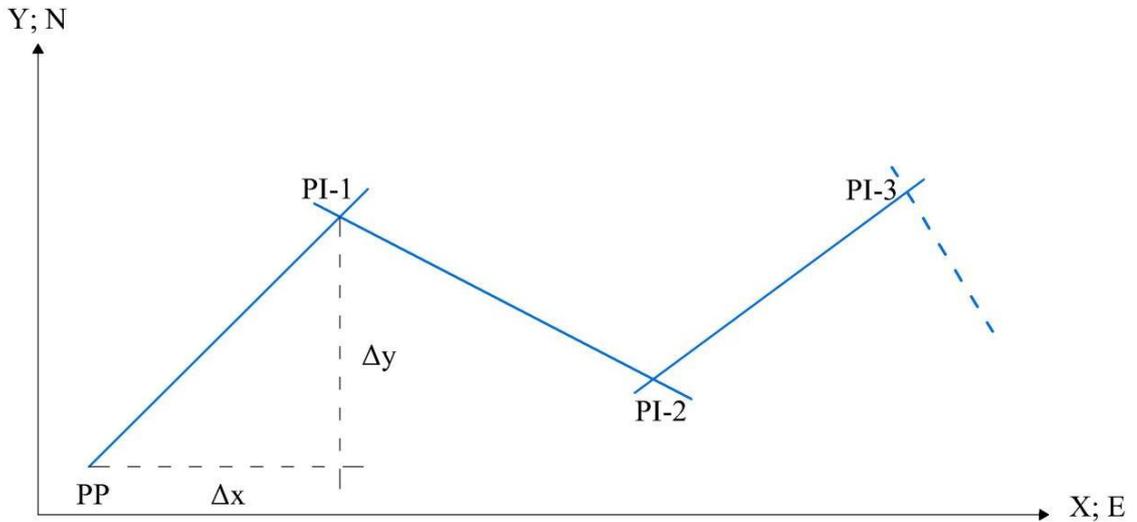
x_1 e y_1 = coordenadas do vértice final do alinhamento (m).

x_0 e y_0 = coordenadas do vértice inicial do alinhamento (m).

É importante destacar que as projeções possuem sinal, podendo ser, portanto, positivas ou negativas. Como trata-se de distâncias, elas adotam também uma precisão de 3 casas decimais.

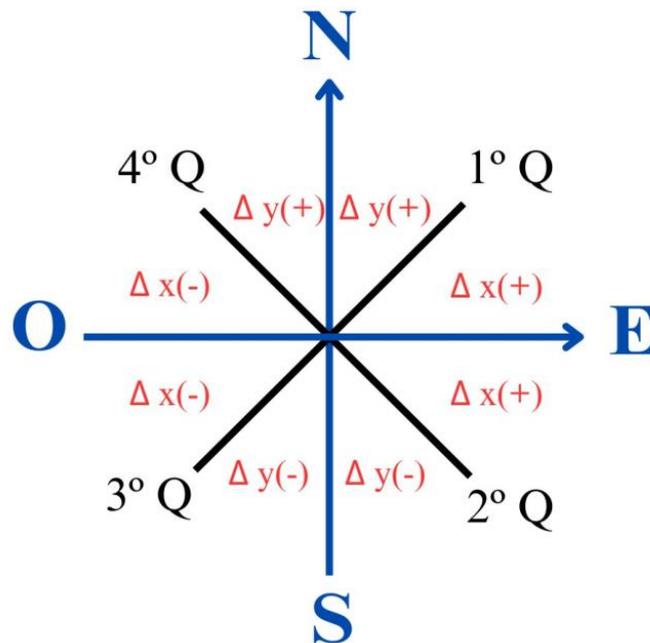
Na Figura 35, é apresentado o sinal dos alinhamentos em relação aos quadrantes aos quais eles pertencem (NE, SE, NO ou SO). Assim, quando tanto a projeção X como a projeção Y do alinhamento são positivas, este se encontra no primeiro quadrante, ou quadrante NE. Projeção X positiva e projeção Y negativa caracterizam um alinhamento no segundo quadrante

(SE), enquanto se ambas projeções são negativas, o alinhamento se encontrará no terceiro quadrante (SO). Finalmente, se a projeção X é negativa e a projeção Y é positiva, o alinhamento pertence ao quarto quadrante ou NO.

 Figura 34: Projeções Δx e Δy dos alinhamentos.


Fonte: Autores.

Figura 35: Quadrantes geográficos.



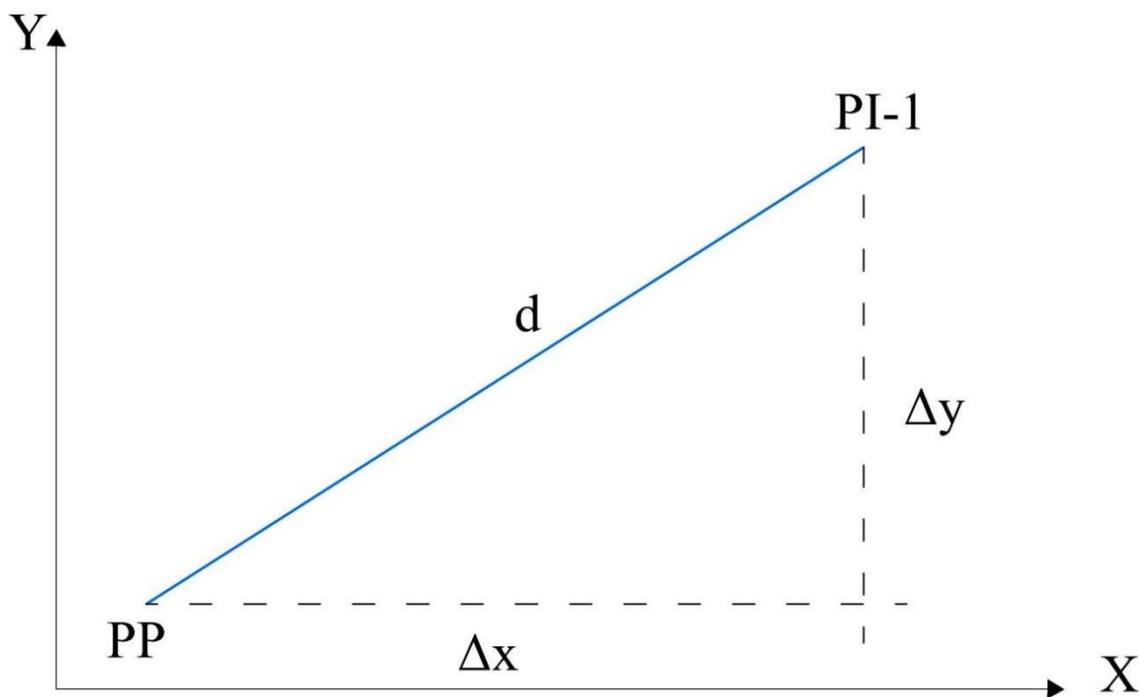
Fonte: Autores.

Quando a projeção X é nula, indica que o alinhamento está localizado no eixo Y , com direção e sentido para o Norte (quando a projeção Y é positiva) ou para o Sul (quando a projeção Y é negativa). Por outro lado, quando a projeção Y é nula, significa que o alinhamento está na direção e sentido Leste (quando a projeção X é positiva) ou Oeste (quando a projeção X é negativa). É importante ressaltar que não existe alinhamento com projeções X e Y nulas simultaneamente.

3.1.1.3. Comprimento dos alinhamentos

O comprimento de um alinhamento é a distância entre os vértices que o delimitam. Essa distância é medida em projeção horizontal, ou seja, é uma distância topográfica. Na Figura 36, se representam os vértices do primeiro alinhamento de uma poligonal aberta (do PP ao $PI-1$), suas projeções (que são perpendiculares entre si) e a distância entre eles.

Figura 36: Comprimento do alinhamento.



Fonte: Autores.

Essa configuração forma um triângulo retângulo, no qual as projeções correspondem aos catetos e a distância é a hipotenusa (Equação 3):

$$d = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} \quad (3)$$

Onde:

d = distância (m).

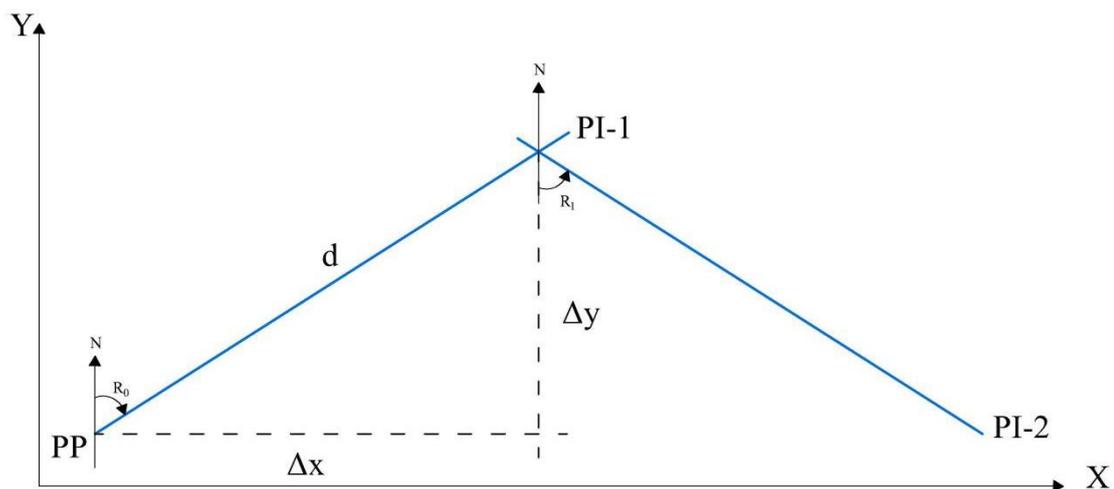
Δx e Δy = projeções no eixo X e Y, respectivamente (m).

3.1.1.4. Rumo dos alinhamentos

O rumo é definido como o menor ângulo formado entre o alinhamento e a direção Norte-Sul (eixo Y). Esse ângulo varia de 0° a 90° e deve ser expresso indicando o quadrante ao qual ele pertence (NE, SE, NO e SO). É importante destacar que, para um alinhamento ter rumo, ele deve obrigatoriamente ter um sentido específico, e para esse rumo estar corretamente definido, deve ter informado o quadrante. Na Figura 36, o primeiro alinhamento da poligonal aberta parte do ponto de partida (PP) em direção ao PI-1.

O rumo dos alinhamentos deve ser sempre observado no vértice de início, como exemplificado na Figura 37, no PP para o primeiro alinhamento (R_0) e no PI-1 para segundo alinhamento (R_1).

Figura 37: Rumos de alinhamentos.



Fonte: Autores.

O cálculo do valor do ângulo de um rumo pode ser realizado por meio do arco tangente da relação entre as projeções do alinhamento (Equação 4). Ao efetuar o cálculo do rumo de um alinhamento, é importante representá-lo em graus e não em gradus ou radianos. Normalmente, a representação dos graus é feita no formato de graus, minutos e segundos, em vez de formato decimal.

$$rumo = \text{atan} \left(\frac{\Delta x}{\Delta y} \right) \text{ (NE, SE, NO ou SO)} \quad (4)$$

Onde:

$rumo$ = valor angular ($^{\circ}$ ' ") seguido do quadrante (NE, SE, NO ou SO).

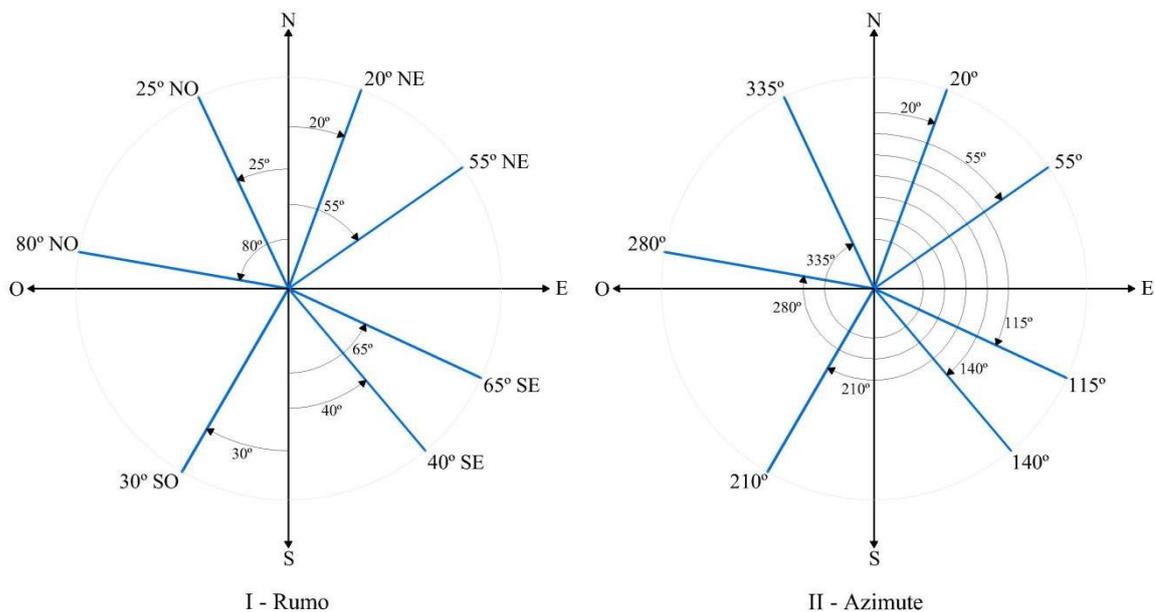
Δx e Δy = projeções no eixo X e Y, respectivamente (m).

3.1.1.5. Azimute dos alinhamentos

O azimute é definido como o ângulo formado entre o alinhamento e a direção do Norte geográfico, ou seja, é medido entre o eixo Y e o alinhamento, sempre no sentido horário, sendo que o Norte possui o valor de 0° . Assim, o azimute pode variar entre 0° e 360° . Da mesma forma que o rumo, ele é representado no formato de graus, minutos e segundos, mas não precisa da especificação do quadrante.

Na Figura 38, são apresentados o rumo e o azimute para diferentes alinhamentos e a correspondência entre eles.

Figura 38: Relação entre rumos e azimutes.



Fonte: Autores.

A conversão do rumo a azimute pode ser realizada com ajuda das Equações 5 a 8, dependendo do quadrante em que se encontra o alinhamento:

$$1^{\circ} \text{ Q (NE)} \quad \text{azimute} = \text{rumo} \quad (5)$$

$$2^{\circ} \text{ Q (SE)} \quad \text{azimute} = 180^{\circ} - \text{rumo} \quad (6)$$

$$3^{\circ} \text{ Q (SO)} \quad \text{azimute} = 180^{\circ} + \text{rumo} \quad (7)$$

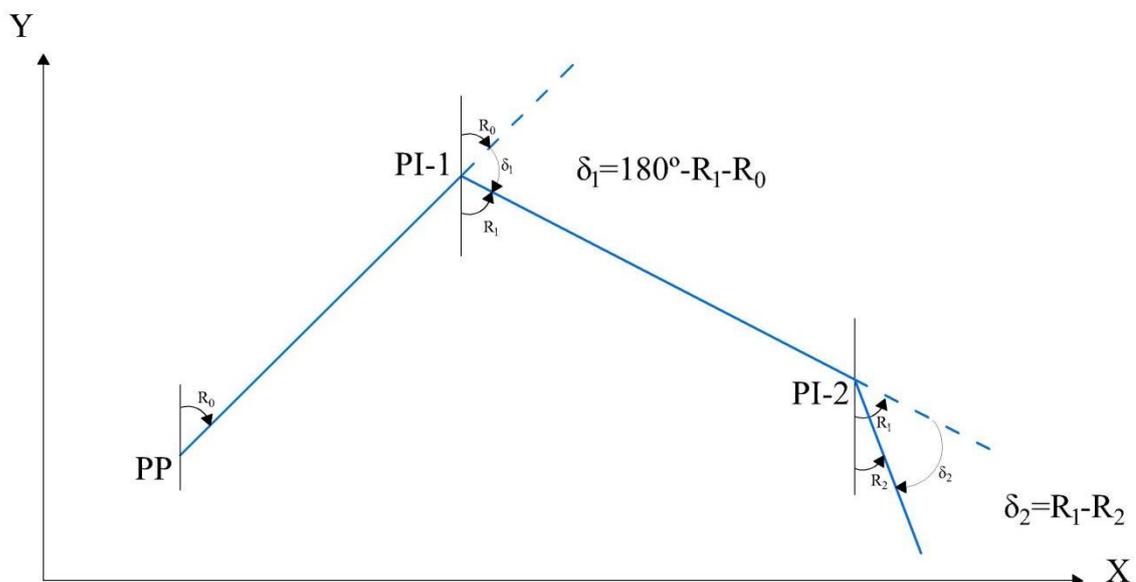
$$4^{\circ} \text{ Q (NO)} \quad \text{azimute} = 360^{\circ} - \text{rumo} \quad (8)$$

3.1.1.6. Deflexões entre os Alinhamentos

A deflexão é o ângulo que mede a mudança de direção entre alinhamentos consecutivos. É determinada pelo ângulo formado entre o prolongamento do alinhamento anterior e o alinhamento posterior. A origem do ângulo está sempre no prolongamento do alinhamento anterior. Quando a deflexão ocorre no sentido horário, é considerada à direita (D), e no sentido anti-horário, à esquerda (E). É importante sempre indicar o lado da deflexão junto ao seu valor angular.

O cálculo da deflexão δ é obtido pela relação entre os rumos ou azimutes dos alinhamentos consecutivos, de acordo com os quadrantes que se encontram. É recomendável representar graficamente os alinhamentos para determinar o valor e o sentido da deflexão. O intervalo possível de variação da deflexão é de 0° a 180° e também é representado sempre em formato de graus, minutos e segundos, seguido do lado (D ou E) (Figura 39).

Figura 39: Deflexões entre alinhamentos.



Fonte: Autores.

3.1.2. Planilha da Poligonal Aberta

A planilha da poligonal aberta tem como objetivo agrupar todos os elementos anteriormente definidos, permitindo uma organização clara e precisa das informações, assim como identificar a localização das estacas nos pontos de inflexão (PIs) (Figura 40). Partindo de uma planilha vazia, ela é preenchida iniciando pela identificação dos pontos (primeira coluna à esquerda) e suas respectivas coordenadas x e y (nas duas colunas à direita). Esses dados normalmente são escolhidos pelo engenheiro a partir da definição do traçado da rodovia.

Figura 40: Exemplo de planilha da poligonal aberta

Ponto de inflexão				Alinhamento				Projeções				Coordenadas	
Nº	Est. ou km	Deflexão	Lado	Azimute	Rumo (° ' '')	Q	Comprimento (m)	Leste (+)	Oeste (-)	Norte (+)	Sul (-)	x	y
PP	0+000,000											0,000	0,000
1	1+022,509	54° 43' 58,53"	D	42° 49' 12,88"	42° 49' 12,88"	NE	1022,509	695,000		750,000		695,000	750,000
2	1+935,430	65° 32' 52,03"	E	97° 33' 11,41"	82° 26' 48,59"	SE	912,921	905,000			120,000	1600,000	630,000
3	2+878,828	76° 32' 49,30"	E	32° 00' 19,38"	32° 00' 19,38"	NE	943,398	500,000		800,000		2100,000	1430,000
PF	3+762,740	-	-	315° 27' 30,08"	44° 32' 29,92"	NO	883,912		620,000	630,000		1480,000	2060,000
1°	7°	6°		5°	4°		3°			2°			1°

Fonte: Autores.

O primeiro passo do procedimento de cálculo é a determinação das projeções dos alinhamentos, que são obtidas aplicando as Equações 1 e 2. A posição das projeções em uma das colunas é determinada pelo seu sinal. Na Figura 40, pode-se observar que as linhas de projeção vertical não estão alinhadas com as colunas de coordenadas. Essa disposição foi utilizada para indicar que a projeção não pertence exclusivamente a um ou outro ponto de inflexão (PI), mas sim ao alinhamento delimitado por esses dois vértices. Esse recurso visual auxilia na compreensão de que as projeções estão associadas aos respectivos segmentos de alinhamento.

Seguidamente, a coluna de comprimento do alinhamento é calculada utilizando a Equação 3 e representa a distância horizontal entre os pontos de inflexão (PIs). A coluna de rumo é determinada aplicando a Equação 4, enquanto o quadrante (Q) do rumo é obtido por meio da análise das colunas de projeção preenchidas. A coluna de azimute é calculada a partir da conversão do rumo segundo as Equações 5 a 8. Ao longo do processo, recomenda-se a representação gráfica dos alinhamentos nos eixos cartesianos X e Y, que auxilia na visualização e compreensão dos dados, contribuindo para a interpretação dos resultados obtidos. Ademais,

neste passo permitirá também a análise e o cálculo da deflexão (informando assim o valor numérico e lado nas colunas correspondentes da planilha).

Finalmente, a planilha é preenchida com as informações das estacas dos pontos de inflexão da poligonal aberta, a partir da estaca do PP, que geralmente é pré-definida como 0+000,000. A partir dos comprimentos dos alinhamentos podem ser calculadas as estacas de cada ponto, somando-se os comprimentos de forma consecutiva. O cálculo da estaca do PF define o comprimento total da poligonal aberta, como mostra a Figura 40.

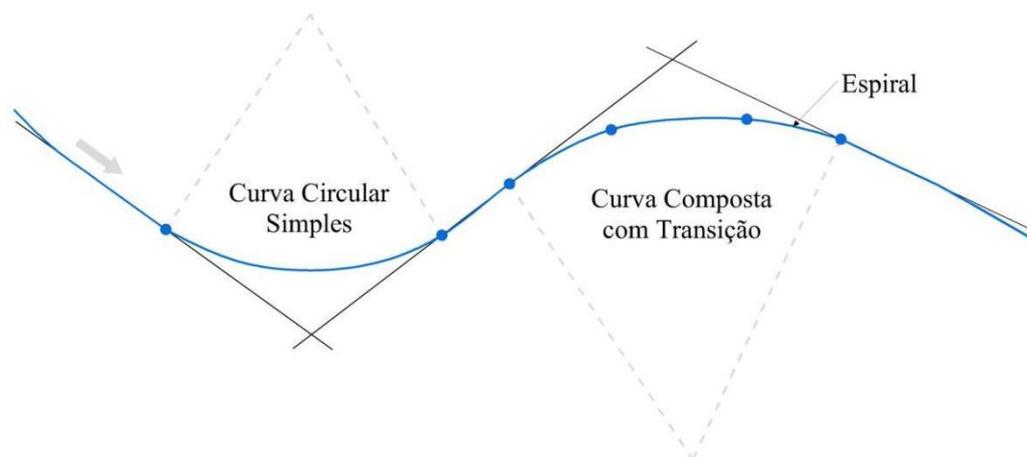
3.2. CURVAS DE CONCORDÂNCIA HORIZONTAL

3.2.1. Tipos de curvas de concordância horizontal

Uma vez definida a poligonal aberta que define o traçado da rodovia, devem ser inseridas curvas nos pontos de inflexão (Figura 41). Tais curvas, denominadas de concordância horizontal são elementos utilizados para garantir a transição suave entre os alinhamentos retos e são classificadas como:

- **Curvas simples:** quando são empregados arcos de curvas circulares.
- **Compostas sem transição:** quando são utilizados dois ou mais arcos de curvas circulares com raios diferentes para fazer a transição entre os alinhamentos retos.
- **Composta com transição:** quando são utilizados segmentos de curva espiral no início e no fim de uma trajetória curvilínea.

Figura 41: Representação planimétrica com curvas de concordância horizontal.



Fonte: Autores.



A projeção de uma curva de concordância horizontal envolve, principalmente, a determinação do raio de curvatura, considerando diversas condições técnicas, econômicas, estéticas e operacionais e visando sempre a segurança dos usuários da rodovia.

3.2.2. Escolha do raio das curvas de concordância horizontal

O valor de raio das curvas não pode ser menor que o mínimo estabelecido pela norma (DNER, 1999) e deve ser o mais amplo possível, proporcionando sempre uma boa adaptação do trajeto curvilíneo ao terreno natural. De acordo com a velocidade de projeto e a superelevação máxima adotada ($e_{m\acute{a}x}$) (de 8% para rodovias de classe II, III e IV, e de 10% para a classe 0 e I), se determina o valor mínimo de raio que pode ser utilizado na curva (Tabela 4). Ou seja, não é possível projetar uma curva horizontal com valores de raio menores que os determinados nessa tabela. A partir desse valor mínimo, é possível, mas a curva deverá ser obrigatoriamente de tipo composta com transição.

Tabela 4: Raio mínimo para projeto de curva horizontal composta.

Velocidade diretriz (km/h) e_{max} (%)	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	590

Fonte: DNER, 1999, página 71.

No caso de desejar projetar uma curva de concordância horizontal de tipo simples, o valor do raio deve ser maior, sempre superior ao valor determinado pela Tabela 5 a partir da velocidade diretriz da rodovia.

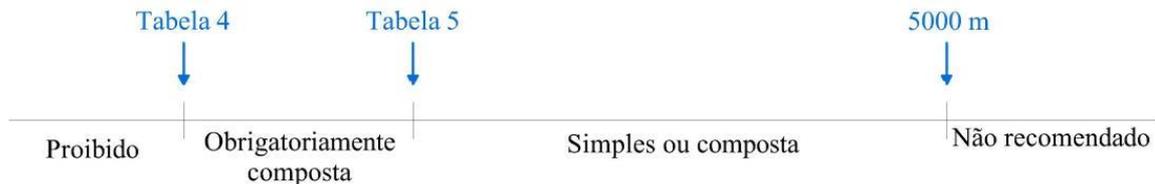
Tabela 5: Raio mínimo para projeto de curva horizontal simples.

V (km/h)	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
R (m)	170	300	500	700	950	1200	1550	1900	2300	2800

Fonte: DNER, 1999, página 105.

Portanto, os valores determinados pelas Tabelas 4 e 5 possibilitam a definição de intervalos de projeto dos raios, segundo o tipo de curva, como se observa na Figura 42. Mesmo que seja recomendado projetar as curvas com o raio mais amplo possível, não é desejável utilizar raios maiores de 5000 m.

Figura 42: Diagrama de escolha de raio de curva de concordância horizontal.

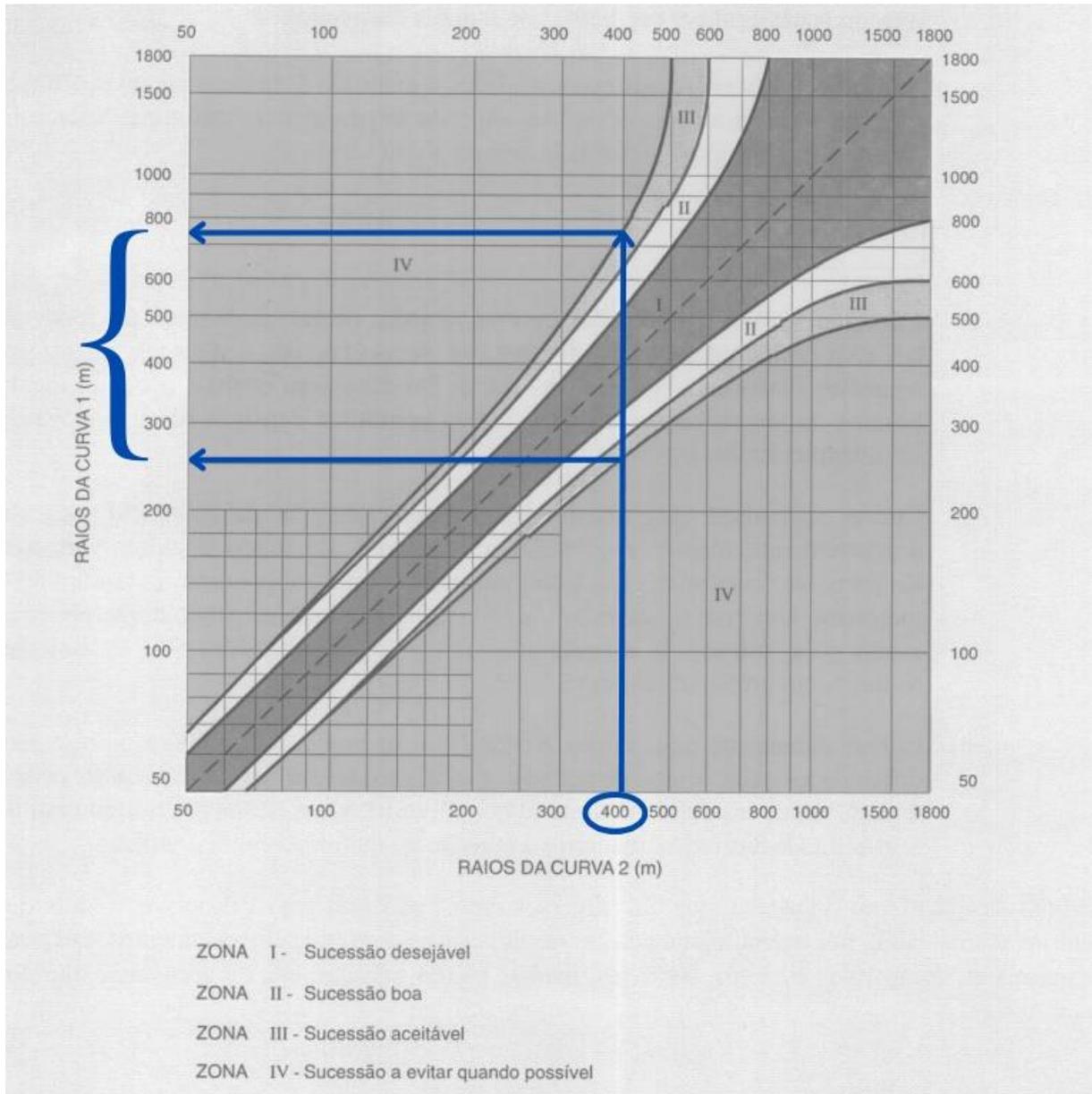


Fonte: Autores.

Além disso, a sequência de curvas deve ser projetada de forma a manter uma relação entre si, garantindo que a variação do raio fique dentro de um intervalo seguro. Isso evita grandes variações na velocidade operacional, proporcionando uma condução mais segura e confortável ao longo da estrada. Para isso, utiliza-se a Figura 43, em que a partir do valor do raio de uma curva, fica definido o intervalo possível de raios para as curvas anterior e/ou posterior, que devem ficar sempre nas Zonas I (sucessão desejável), II (sucessão boa) ou III (aceitável). Não é admissível sucessão de curvas cujos raios fiquem representados na Zona IV (a evitar).

Por outro lado, quando a deflexão existente entre os alinhamentos consecutivos é muito pequena, menor de 15° , a norma dispensa a incorporação de curva. Além disso, não é recomendado projetar curvas consecutivas no mesmo sentido, preferindo-se, nesse caso, unir os alinhamentos por uma única curva de raio mais amplo. Quando isso não for possível, deve existir uma distância suficientemente ampla entre a saída de uma curva e a entrada da seguinte, que permita ao condutor perceber essa mudança de planimetria. Nesse caso, a norma recomenda que essa distância, denominada intertangente, por se localizar entre os pontos de tangência final de uma curva e inicial da curva seguinte, seja, como mínimo, o valor em metros do quádruplo da velocidade diretriz da rodovia em km/h (intertangente entre curvas consecutivas no mesmo sentido $> 4 * V$).

Figura 43: Critérios desejáveis para orientar a escolha dos raios de curvas sucessivas.



Fonte: Adaptado de DNER, 1999, página 66.

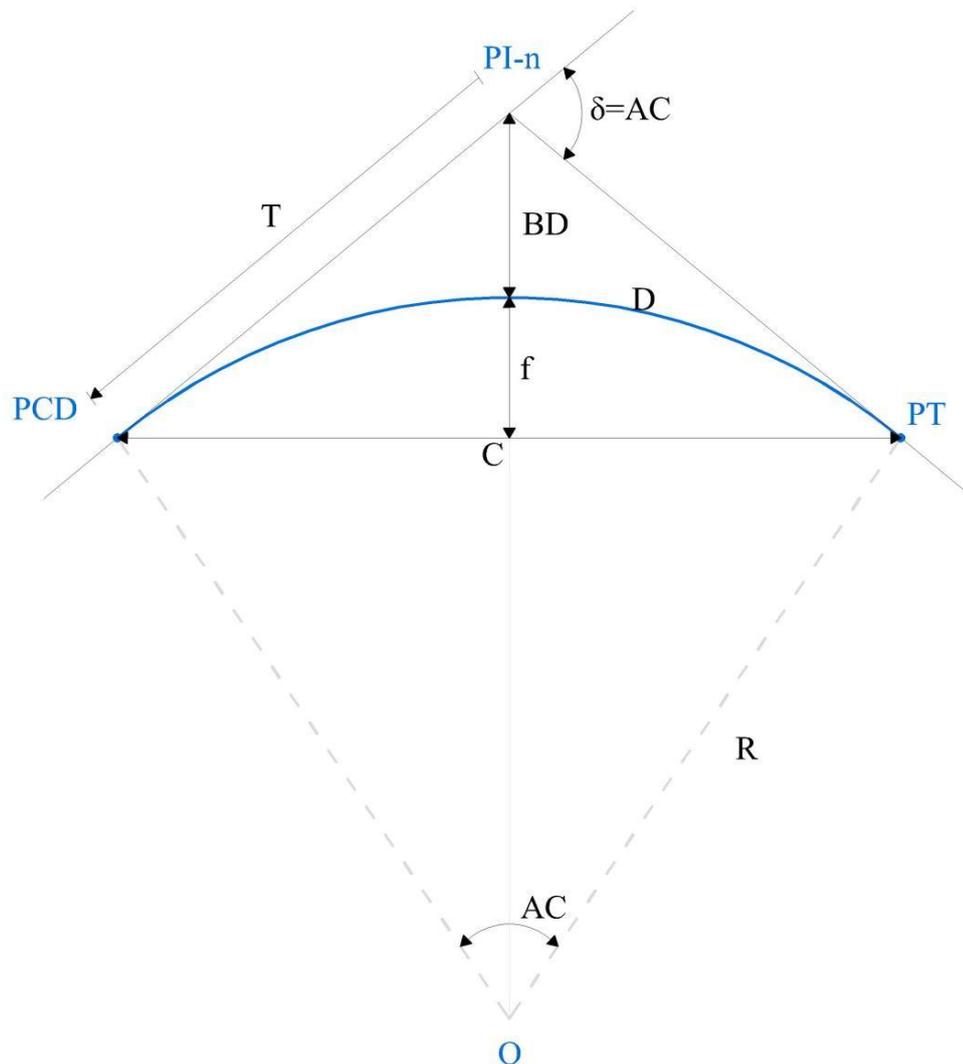
3.2.3. Curva circular simples

A curva circular simples é um elemento de concordância que utiliza um arco circular para conectar dois alinhamentos consecutivos. O arco circular é tangente aos alinhamentos no ponto de início da curva (PC) e no ponto final (PT). A extensão do arco, ao longo da curva, é chamada de desenvolvimento. Os pontos fundamentais da curva de concordância horizontal simples são representados na Figura 44:

- **O**: centro da curva.

- **PI-n:** ponto de inflexão (interseção das tangentes).
- **PC (D ou E):** ponto de início de curva (direita ou esquerda, segundo o lado da deflexão da curva).
- **PT:** ponto de início de intertangente (ou o fim da curva).

Figura 44: Desenho da curva de concordância horizontal circular simples.



Fonte: Autores.

Uma curva de concordância horizontal circular simples pode ser projetada e calculada seguindo os seguintes passos:

- I. **AC:** ângulo central, cujo valor é igual ao valor angular da deflexão (informação procedente do cálculo da planilha de poligonal aberta).
- II. **Raio:** é definido pelo projetista de acordo com as recomendações e condicionantes técnicas e do terreno.



III. **Tangente:** calcula-se o valor da tangente através da Equação 9:

$$T = R \times \tan\left(\frac{AC}{2}\right) \quad (9)$$

IV. **Desenvolvimento:** conforme Equação 10; no caso de curvas de AC menor de 5°, deve-se utilizar a relação seguinte (D (em metros) $> 30 \times (10 - AC)$, com AC em graus):

$$D = R \times AC \times \frac{\pi}{180} \quad (10)$$

V. **BD:** segundo Equação 11:

$$BD = R \times \left[\frac{1}{\cos\left(\frac{AC}{2}\right)} - 1 \right] \quad (11)$$

VI. **Flecha máxima:** através da Equação 12:

$$f = R \times \left[1 - \cos\left(\frac{AC}{2}\right) \right] \quad (12)$$

VII. **Corda:** segundo Equação 13:

$$C = 2 \times R \times \sin\left(\frac{AC}{2}\right) \quad (13)$$

Onde:

AC = ângulo central (° ' ").

R = raio (m).

T = tangente (m).

D = desenvolvimento (m).

BD = distância entre PI e o centro da curva (m).

f = flecha (m).

C = corda (m).

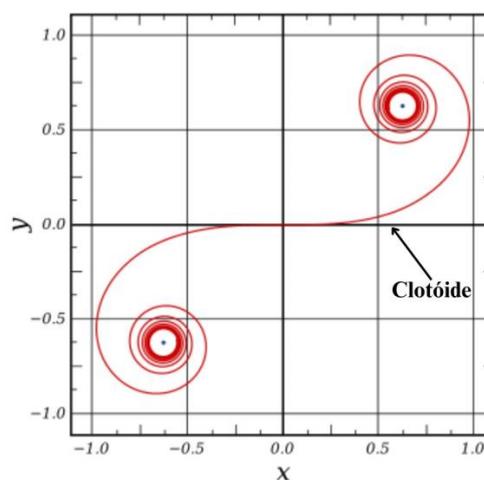
Para que uma curva de concordância horizontal de tipo simples esteja completamente projetada, devem ser determinados e informados os valores dos seguintes elementos: AC , R , D e T . Os demais consideram-se elementos secundários.

3.2.4. Curva composta com transições

No projeto geométrico de rodovias, surgiram técnicas para amenizar os efeitos indesejáveis da força centrífuga em curvas. Uma abordagem comum é a adoção de curvas compostas por segmentos curvilíneos em espiral na entrada e saída, com um arco circular no centro. Esse tipo de curva tem como objetivo suavizar a transição entre o trecho retilíneo da estrada (tangente) e a curva, reduzindo as mudanças bruscas de direção e minimizando os efeitos da aceleração centrífuga sobre os veículos. Também apresentam melhor desempenho para incorporação da superelevação e da superlargura necessárias nas curvas, como será analisado no capítulo 5.

Para alcançar esse objetivo, as curvas são projetadas utilizando a espiral de Cornu, também conhecida como espiral de Euler ou **clotóide** (Figura 45), onde a curvatura aumenta gradualmente, de forma proporcional à distância percorrida nela. Dessa forma, essa espiral permite que os veículos façam uma transição suave da reta para a curva, proporcionando um ajuste progressivo da trajetória conforme avançam no seu percurso. Já no centro da curva, é usado um arco circular de curvatura constante. Esse trecho circular permite que o veículo mantenha uma trajetória estável durante a curva, evitando mudanças repentinas na direção. Na saída da curva, é aplicado um segmento curvilíneo em espiral inversa, que gradualmente reduz a curvatura até a tangente seguinte aproveitando a mesma propriedade geométrica da clotóide. Essa espiral inversa proporciona uma transição suave da curva para a reta, permitindo que o veículo retome uma trajetória retilínea de forma gradual.

Figura 45: Clotóide.

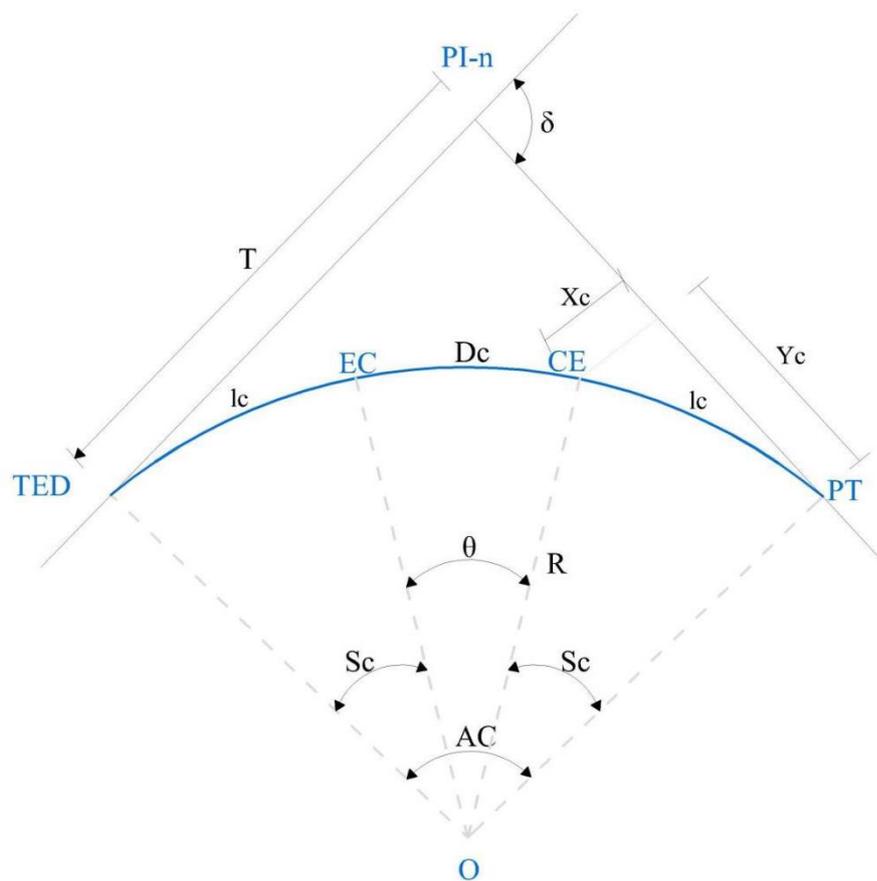


Fonte: WIKIPÉDIA (Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Espiral_de_Cornu>. Acesso em: 20 set. 2023).

A norma (DNER, 1999) estabelece que somente é dispensável o uso de curvas de transição nas concordâncias horizontais com curvas circulares de raios superiores aos indicados na Tabela 5, para as velocidades ali determinadas. No entanto, mesmo nesses casos, se for possível, a norma recomenda projetar curvas compostas, pelos benefícios anteriormente destacados.

Na Figura 46 são apresentados os elementos e pontos principais que caracterizam a curva horizontal composta com transição.

Figura 46: Desenho da curva horizontal composta com transição.



Fonte: Autores.

Os pontos principais de uma curva composta com transição são os seguintes:

- **O**: centro da curva.
- **PI-n**: ponto de inflexão (interseção das tangentes).
- **TE (D ou E)**: ponto de início de curva (tangente-espinal) (direita ou esquerda, segundo o lado da deflexão da curva).

- **EC:** primeiro ponto osculador, de fim da primeira espiral e início do trecho circular central (espiral-circular).
- **CE:** segundo ponto osculador, de fim do trecho circular central e início da segunda espiral (circular-espiral).
- **ET:** ponto de início de intertangente (ou o fim da curva: espiral-tangente).

Uma curva composta com transição pode ser projetada e calculada seguindo os seguintes passos:

- I. **AC:** o ângulo central é igual a deflexão (informação já disponível do cálculo da poligonal aberta).
- II. **Raio:** é definido pelo projetista de acordo com as recomendações e circunstâncias indicadas nas seções anteriores.
- III. **Comprimento de espiral de transição - lc :** o valor do comprimento da espiral precisa possibilitar a mudança gradativa da curvatura da trajetória do veículo sem que a variação da aceleração centrípeta associada não exceda um limite máximo, a fim de manter as condições de conforto e segurança. Para determinar o comprimento necessário para alcançar essa máxima variação na aceleração, a experiência internacional sugere que a taxa máxima adequada seja de $0,6 \text{ m/s}^2$ por segundo. O cálculo do comprimento de transição desejável e mínimo é estabelecido pelas Equações 14 e 15, respectivamente. Esse valor deve ser arredondado para o próximo múltiplo de 10 metros.

$$lc = 6 \times \sqrt{R} \quad (14)$$

$$lc_{\min} = 0,036 \frac{Vd^3}{R} \quad (15)$$

Além da comprovação do comprimento adotado (lc) ser igual ou superior ao valor mínimo, é preciso conferir que também seja superior ao valor apresentado na Tabela 6.

Tabela 6: lc_{\min} segundo a velocidade diretriz.

V(km/h)	40	50	60	70	80	90	100	110	120
L (m)	30	30	30	40	40	50	60	60	70

Fonte: DNER (1999).

- IV. **Ângulo de transição - Sc :** conforme a Equação 16:



$$Sc = \frac{lc}{2 \times R} \quad (16)$$

V. **Ângulo central de trecho circular - θ** : segundo Equação 17:

$$\theta = AC \times \frac{\pi}{180} - 2 \times Sc \quad (17)$$

VI. **Coordenadas retangulares dos pontos osculadores EC e CE (Yc e Xc)**: a partir das expressões das Equações 18 e 19:

$$Yc = lc \times \left(1 - \frac{Sc^2}{10} + \frac{Sc^4}{216}\right) \quad (18)$$

$$Xc = lc \times \left(\frac{Sc}{3} - \frac{Sc^3}{42}\right) \quad (19)$$

VII. **Desenvolvimento do trecho circular - Dc** : a partir da Equação 20:

$$Dc = R \times \theta \quad (20)$$

VIII. **Desenvolvimento total da curva - Dt** : segundo a Equação 21:

$$Dt = Dc + 2 \times lc \quad (21)$$

IX. **Recuo para inserção da transição - q** : pela Equação 22:

$$q = Yc - R \times \text{sen}(Sc) \quad (22)$$

X. **Afastamento das tangentes - p** : pela Equação 23:

$$p = Xc - R \times [1 - \text{cos}(Sc)] \quad (23)$$

XI. **Tangente - T** : a partir da Equação 24:

$$T = q + (R + p) \times \tan\left(\frac{AC}{2}\right) \quad (24)$$

XII. **BD da curva de transição**: mediante a Equação 25:

$$BD = (R + p) \times \sec\left(\frac{AC}{2}\right) - R \quad (25)$$

Onde:

Vd = velocidade diretriz (km/h).

R = raio da curva (m).

lc = comprimento da espiral da curva de transição (m).

AC = ângulo central ($^{\circ}$ ' ").

Sc = ângulo de transição (rad).

θ = ângulo central do trecho circular (rad).

Xc e Yc = coordenadas retangulares dos pontos osculadores EC e CE (m).

Dc = desenvolvimento circular (m).

Dt = desenvolvimento total da curva (m).

q = recuo para inserção da transição (m);

p = afastamento das tangentes (m);

T = tangente (m);

BD = distância entre o PI e o centro da curva (m).

Para que uma curva de concordância horizontal de tipo composta com transição esteja completamente projetada, devem ser determinados e informados os valores dos seguintes elementos: AC , R , lc , Dc e T .

3.2.5. Inconformidades Planimétricas

Inconformidades planimétricas referem-se a irregularidades ou desvios em relação ao traçado planejado de uma rodovia em planta. Podem ser classificadas como erros ou alertas. Os erros obrigatoriamente devem ser corrigidos, pois indicam que o projeto planimétrico é inviável, enquanto os alertas devem ser corrigidos ou justificados, pois mesmo indicando valores fora da norma não inviabilizam a materialização do eixo da rodovia geometricamente.

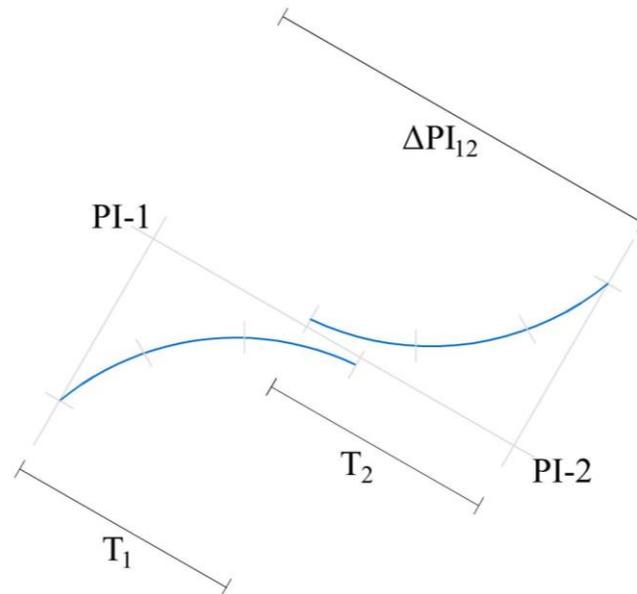
3.2.5.1. Erros planimétricos

Os erros planimétricos podem se manifestar de duas formas distintas:

- **Intertangente negativa:** é uma forma de erro planimétrico que ocorre quando duas curvas consecutivas apresentam uma soma de suas tangentes ($T_1 + T_2$) maior do que a distância entre os Pontos de Inflexão correspondentes (ΔPI_{12}) (Figura 47). Esse tipo de erro resulta no fenômeno conhecido como “acavalamento” das curvas, ou seja, uma curva avança dentro da seguinte e se sobrepõem. Para corrigir esse problema, uma solução possível é diminuir o raio de uma ou das duas curvas para assim reduzir os comprimentos das tangentes e possibilitar o afastamento dos pontos de fim de uma curva e do início da curva seguinte. Porém, se os raios das curvas já estiverem com o valor mínimo permitido, será necessário analisar a possibilidade de trocar a posição de um ou

ambos os pontos de inflexão. Essa troca de posição dos PI pode ajudar a aumentar a distância entre os PI e evitar o “acavalamento” das curvas.

Figura 47: Intertangente negativa



Fonte: Autores.

- **Desenvolvimento circular negativo:** é um tipo de erro que ocorre apenas em curvas de transição quando o comprimento das clotóides (lc) reduz o desenvolvimento circular (Dc) a um valor inferior a zero. Isso resulta no acavalamento das espirais, e se detecta pela inversão das posições das estacas dos pontos osculadores EC e CE. Para a correção desse erro, na maioria dos casos, é possível reduzir o lc , ajustando assim a geometria da curva de transição e evitando que o desenvolvimento circular se torne negativo. É importante destacar que o comprimento das clotóides (lc) não pode ser inferior ao valor mínimo estabelecido. Caso seus valores já estejam nesse limite, outra possível solução é reduzir o valor do raio, mas também verificando que não se torne inferior ao valor mínimo determinado pela Tabela 4. Nesse último caso, a solução passa pela alteração da posição dos pontos de inflexão envolvido e/ou adjacentes, que permita aumentar o ângulo central da curva.

3.2.5.2. Alertas planimétricos

Os alertas planimétricos não devem ser considerados como erros, mas sim como indicações de valores que estão fora da norma estabelecida. É recomendado o uso de valores

que estejam em conformidade com a norma, a fim de garantir uma geometria adequada e segura para a rodovia. Caso não seja possível atender aos valores estabelecidos, é permitido, mediante justificativa técnica, o uso de valor fora da norma. É importante destacar que, nesse caso, o projetista não estará mais respaldado pelas diretrizes normativas, mas apenas pela sua própria justificativa. Esses alertas são classificados em quatro tipos:

- **Intertangente insuficiente:** surge devido à impossibilidade de distribuir adequadamente a transição da superelevação (e) entre curvas adjacentes (Figura 48). De acordo com as normas, a transição da superelevação deve começar antes do início da curva e terminar após o fim desta. Portanto, para realizar essa distribuição, é necessário ter um trecho em tangente com um comprimento específico antes e depois de cada curva. Essa necessidade de um comprimento em tangente para a distribuição da superelevação cria a exigência de uma intertangente mínima, que depende das características das curvas adjacentes. Para a determinação da intertangente mínima, é necessário o cálculo da superelevação das curvas pela Equação 26 e o comprimento da extensão para eliminação do abaulamento pela Equação 27:

$$e = e_{max} \times \left(\frac{2 \times R_{min}}{R} - \frac{R_{min}^2}{R^2} \right) \quad (26)$$

$$L_T = \frac{lc \times |i|}{e} \quad (27)$$

Onde:

e = valor da superelevação adotada (%).

e_{max} = valor da superelevação máxima (%), segundo a classe da rodovia.

R_{min} = valor do raio mínimo de acordo com a superelevação máxima (m) (Tabela 4).

L_T = extensão da eliminação do abaulamento (m).

lc = comprimento da transição adotada (m).

i = valor do abaulamento (%).

No caso de curvas circulares, onde não existe a clotóide (lc) para a distribuição da superelevação, deve-se adotar 60% do comprimento de transição fora da curva. Embora não exista transição, é possível realizar o cálculo de um valor de lc virtual, como será tratado em detalhe no capítulo 5. Para a parcela de transição adotada fora da curva faz-se uso da Equação 28:

$$L_{60} = 0,6 \times (L_T + lc') \quad (28)$$

Onde:

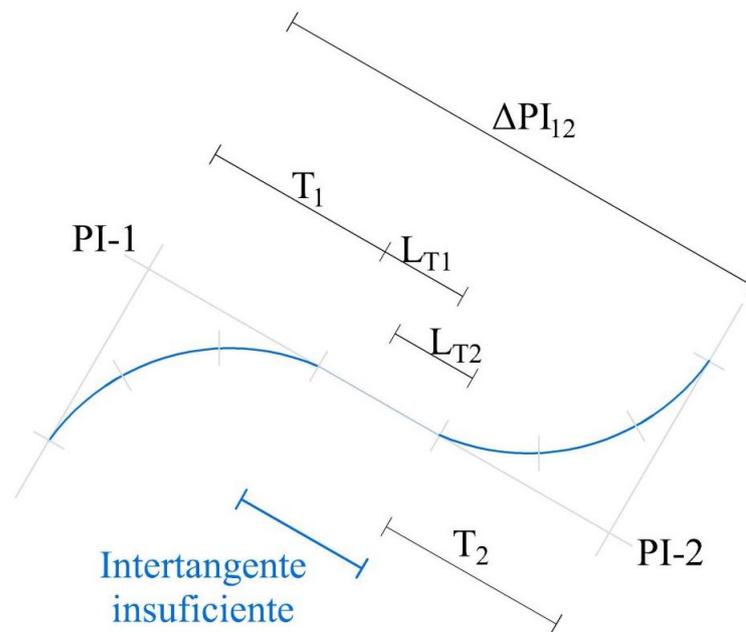
L_{60} = parcela de transição da superelevação fora da curva circular simples.

L_T = extensão da eliminação do abaulamento (m), calculado pela Equação 27.

lc' = comprimento da transição virtual (m).

Realizado o cálculo das transições de superelevação em tangente, para cada curva, a soma destas resultará na intertangente mínima, para cada par de curvas consecutivas ($L_{T1} + L_{T2}$) (Figura 48).

Figura 48: Intertangente insuficiente.



Fonte: Autores.

- **Raio menor que mínimo em curva circular simples:** a Tabela 5 estabelece os valores mínimos de raio para curvas circulares simples. É fundamental evitar a utilização de valores inferiores a esses mínimos estabelecidos. No caso de um raio abaixo do valor mínimo, é possível utilizá-lo, mas transformando a curva em uma curva com transição.
- **Raio menor que mínimo em curva com transição:** a Tabela 4 apresenta os valores mínimos de raio para curvas com transição. É crucial evitar a utilização de valores abaixo desses mínimos estabelecidos. No entanto, caso não haja alternativa viável para atender aos valores mínimos, é necessário fornecer uma justificativa técnica adequada, provavelmente reduzindo a velocidade de operação do trecho afetado. Raios menores que o valor mínimo, mesmo com transições, representam graves problemas de segurança para os motoristas em decorrência da falta de superelevação necessária e da mudança de direção brusca em planta.

- **Comprimento da clotóide menor que o mínimo:** é fortemente desaconselhável utilizar valores abaixo do mínimo estabelecido para a transição em curvas com clotóide. Essa prática pode acarretar problemas graves, como a possibilidade de saída de pista. Uma das principais questões associadas é a insuficiência da superelevação ou mudança excessivamente brusca da curvatura da trajetória, o que pode comprometer a estabilidade dos veículos durante a curva, aumentando o risco de derrapagem ou perda de controle.
- **Sucessão de curvas consecutivas na zona IV:** com base na análise da Figura 43, pode-se observar que curvas consecutivas cujos valores de raios caíam na Zona IV, leva à aparição de inconsistências geométricas significativas. Essas inconsistências resultam em alterações bruscas na velocidade operacional ao longo da via.

3.3. PLANILHA DE COORDENADAS

3.3.1. Estaqueamento

O estaqueamento consiste na divisão do eixo planimétrico da via em segmentos de igual extensão, sendo comum a utilização de estacas de 20 metros de comprimento. Esse procedimento permite ordenar sequencialmente o eixo da via, facilitando a localização de todos os dispositivos de projeto com base na distância a partir da origem.

Ao realizar o estaqueamento, cada segmento da via é numerado com uma estaca, de modo que seja possível identificar sua localização precisa ao longo do eixo. Esse sistema de numeração sequencial fornece uma referência clara para a implantação de elementos do projeto, como placas de sinalização, marcos quilométricos, dispositivos de segurança, entre outros.

O cálculo do estaqueamento de um eixo em planta envolve a determinação das estacas correspondentes aos pontos principais das curvas horizontais, bem como o comprimento do trecho projetado. Esses pontos principais incluem o Ponto de Partida (PP), pontos de início e fim de curvas simples (PC e PT), pontos correspondentes ao traçado de curvas compostas (TE, EC, CE e ET) e o Ponto Final (PF).

O cálculo do estaqueamento começa com a definição da estaca do ponto de partida (PP). Na maioria dos casos, o valor dessa estaca é zero (km 0+000,000), mas pode assumir qualquer valor, positivo ou negativo. Para fins de cálculo, o PP é considerado como o fim de uma curva

virtual, bem como o ponto final (PF) é considerado o início de uma curva virtual. Com esse procedimento, a distância entre o PP e o PC ou TE da próxima curva é considerada como a intertangente entre essa curva “virtual” e a primeira curva. Da mesma forma, a distância entre o final da última curva e o PF também será calculado como a intertangente correspondente. As equações necessárias para o cálculo dos pontos característicos do eixo são apresentadas a seguir (Equações 29 a 35):

$$\Delta PI_{01} = \sqrt{(x_{PI_1} - x_{PI_0})^2 + (y_{PI_1} - y_{PI_0})^2} \quad (29)$$

$$IntTan_{01} = \Delta PI_{01} - T_{PI_0} - T_{PI_1} \quad (30)$$

$$km_{PC \text{ ou } TE} = km_{PC \text{ ou } ET_0} + IntTan_{01} \quad (31)$$

$$km_{PT} = km_{PC} + D_{PI} \quad (32)$$

$$km_{EC} = km_{TE} + lc_{PI} \quad (33)$$

$$km_{CE} = km_{EC} + Dc_{PI} \quad (34)$$

$$km_{ET} = km_{CE} + lc_{PI} \quad (35)$$

Onde:

x e y = coordenadas geográficas do PI conforme anterior (índice 0) ou posterior (índice 1) (m).

ΔPI_{01} = distância do PI_0 (anterior) ao PI_1 (posterior) (m).

$IntTan_{01}$ = intertangente, ou distância do fim da curva do PI_0 (PT ou ET) ao início da curva do PI_1 (PC ou TE) (m).

D = desenvolvimento da curva circular simples (m).

lc = comprimento da transição da curva (m).

Dc = desenvolvimento circular da curva composta (m).

km = marco quilométrico ou estaca dos pontos notáveis das curvas (m ou estacas).

3.3.2. Planilha de coordenadas

As informações calculadas para as curvas de concordância horizontal e os pontos notáveis correspondentes costumam ser apresentados de forma ordenada em formato de tabela, denominada planilha de coordenadas. A Figura 49 apresenta um exemplo de planilha de coordenadas e os passos de cálculo para preenchimento da mesma a partir das equações anteriores.

Figura 49: Planilha de coordenadas

PI	Estacaqueamento				Parâmetros da curva						Alinhamento			Coordenadas		
	PC ou ET	EC	CE	PT ou ET	AC (° ' ")	R (m)	Lc1 (m)	Lc2 (m)	Dc (m)	T1 (m)	T2 (m)	Az (° ' ")	InfTan (m)	ΔPI (m)	x (m)	y (m)
PP				0+000											370101,020	6940510,339
1						400									370267,149	6940947,196
2						250	50,000	50,000							369999,497	6941340,982
PF															370082,561	6941836,292
I - Dados iniciais																
PI	Estacaqueamento				Parâmetros da curva						Alinhamento			Coordenadas		
	PC ou ET	EC	CE	PT ou ET	AC (° ' ")	R (m)	Lc1 (m)	Lc2 (m)	Dc (m)	T1 (m)	T2 (m)	Az (° ' ")	InfTan (m)	ΔPI (m)	x (m)	y (m)
PP				0+000											370101,020	6940510,339
1						400									370267,149	6940947,196
2						250	50,000	50,000							369999,497	6941340,982
PF															370082,561	6941836,292
II - Etapas de cálculo																
PI	Estacaqueamento				Parâmetros da curva						Alinhamento			Coordenadas		
	PC ou ET	EC	CE	PT ou ET	AC (° ' ")	R (m)	Lc1 (m)	Lc2 (m)	Dc (m)	T1 (m)	T2 (m)	Az (° ' ")	InfTan (m)	ΔPI (m)	x (m)	y (m)
PP				0+000											370101,020	6940510,339
1	0+256			0+643	55° 1' 27,69"	400			384,142	208,335	208,335	20° 49' 15,25"	259,044	467,379	370267,149	6940947,196
2	0+786	0+836	0+976	1+026	43° 43' 24,54"	250	50,000	50,000	140,780	125,465	125,465	325° 47' 47,55"	142,336	476,136	369999,497	6941340,982
PF	1+403								- ,000	- ,000	- ,000	9° 31' 12,10"	376,761	502,226	370082,561	6941836,292
III - Calculada																

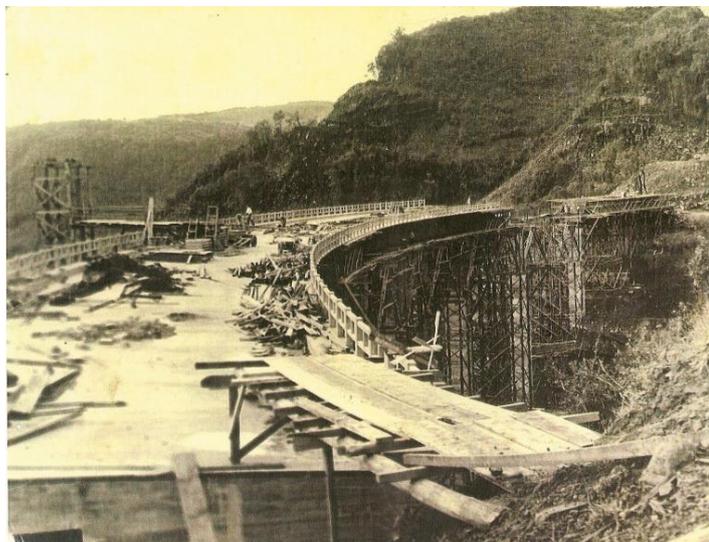
Fonte: Autores.

Assim, partindo dos dados das coordenadas dos pontos de inflexão do traçado, assim como do PP e do PF, assim como dos valores dos raios e transições determinados a partir dos projetos das curvas correspondentes, inicia-se o processo incluindo na planilha os valores das distâncias entre os pontos de inflexão (também determinado pela Equação 29), dos azimutes dos alinhamentos e dos ângulos centrais das curvas, procedentes das informações já contidas na planilha da poligonal aberta (Figura 40). Na sequência projetam-se as curvas de concordância horizontal, determinando seus elementos principais (desenvolvimento circular – Equação 10 ou 20, e tangente – Equação 9 ou 24), assim como as intertangentes correspondentes (Equação 30). Finalmente, se preenchem os valores das estacas dos pontos notáveis das curvas a partir das Equações 31 a 35.

3.3.3. Elementos planimétricos de uma estaca qualquer

No projeto planimétrico de uma rodovia, é de suma importância definir as coordenadas, o azimute e o valor do raio para uma estaca específica. Essas informações são essenciais para garantir a correta localização e posicionamento de elementos estruturais, como pilares de viadutos ou pontes, bem como para a identificação dos encaixes de ramos distintos em uma interseção (Figuras 50 e 51).

Figura 50: Construção da ponte do Vale do Menino Deus.



Fonte: MISSIONEIRO ANTIGOS. (Disponível em:

<https://missioneiroantigos.wordpress.com/2016/01/19/garganta-do-diabo-nao-vale-do-menino-deus/santa-maria-garganta/>). Acesso em: 20 set. 2023).

Figura 51: Viaduto sobre o Guaíba.



Fonte: PRANDI, 2012. Disponível em: <<https://cidadesemfotos.blogspot.com/2012/05/fotos-de-porto-alegre-rs.html>>. Acesso em: 20 set. 2023.

As informações contidas na planilha de coordenadas permitem obter as coordenadas, o azimute e o raio pontual para qualquer estaca ao longo do eixo da via. Porém, é necessário determinar inicialmente as coordenadas e o azimute dos pontos notáveis das curvas: PC, PT, TE, EC, CE e ET. Essas coordenadas e azimutes podem ser determinados utilizando as equações a seguir:

➤ **PC ou TE** (em curva circular substituir TE por PC):

$$AZ_{ET} = AZ_{PI_{i-1}} \quad (36)$$

$$x_{TE} = x_{PI} + \frac{(A_{PI_{i-1}} - A_{PI}) \times T_{PI}}{\Delta PI_a} \quad (37)$$

$$y_{TE} = y_{PI} + \frac{(y_{PI_{i-1}} - y_{PI}) \times T_{PI}}{\Delta PI_a} \quad (38)$$

➤ **PT ou ET** (em curva circular substituir ET por PT):

$$AZ_{ET} = AZ_{PI} \quad (39)$$

$$x_{ET} = x_{PI} + \frac{(x_{PI_{i+1}} - x_{PI}) \times T_{PI}}{\Delta PI_p} \quad (40)$$

$$y_{ET} = y_{PI} + \frac{(y_{PI_{i+1}} - y_{PI}) \times T_{PI}}{\Delta PI_p} \quad (41)$$

➤ **EC:**

$$AZ_{ET} = AZ_{PI_{i-1}} + Lado \times Sc_{PI} \quad (42)$$



$$x_{EC} = x_{TE} + \sqrt{X_{C_{PI}}^2 + Y_{C_{PI}}^2} \times \text{sen} \left[AZ_{TE} + Lado \times \text{atan} \left(\frac{X_{C_{PI}}}{Y_{C_{PI}}} \right) \right] \quad (43)$$

$$y_{EC} = y_{TE} + \sqrt{X_{C_{PI}}^2 + Y_{C_{PI}}^2} \times \text{cos} \left[AZ_{TE} + Lado \times \text{atan} \left(\frac{X_{C_{PI}}}{Y_{C_{PI}}} \right) \right] \quad (44)$$

➤ **CE:**

$$AZ_{CE} = AZ_{PI} - Lado \times S_{C_{PI}} \quad (45)$$

$$x_{CE} = x_{ET} - \sqrt{X_{C_{PI}}^2 + Y_{C_{PI}}^2} \times \text{sen} \left[AZ_{ET} - Lado \times \text{atan} \left(\frac{X_{C_{PI}}}{Y_{C_{PI}}} \right) \right] \quad (46)$$

$$y_{CE} = y_{ET} - \sqrt{X_{C_{PI}}^2 + Y_{C_{PI}}^2} \times \text{cos} \left[AZ_{ET} - Lado \times \text{atan} \left(\frac{X_{C_{PI}}}{Y_{C_{PI}}} \right) \right] \quad (47)$$

Onde:

R = raio da curva do PI corrente (m).

Az = azimute dos pontos notáveis do PI corrente (rad).

x e y = coordenadas geográficas das estacas dos pontos notáveis do PI corrente (m).

ΔPI_a e ΔPI_p = distância entre PI corrente e anterior, e entre PI corrente e posterior (m).

lc_{PI} = comprimento da transição do PI corrente (m).

T_{PI} = tangente da curva (circular ou composta) do PI corrente (m).

$S_{C_{PI}}$ = ângulo da parte em espiral da curva composta do PI corrente (rad).

$X_{C_{PI}}$ e $Y_{C_{PI}}$ = coordenadas retangulares dos pontos osculadores das curvas de transição do PI corrente (m).

$Lado$ = considerar -1 para inflexão à esquerda e +1 para à direita para PI corrente.

$i-1$ e $i+1$ = indicação para PI anterior ou posterior.

A partir das coordenadas dos pontos notáveis, é possível calcular as informações necessárias para localização de qualquer estaca, dependendo de se está em trecho retilíneo (intertangente) ou em curva (dentro de trecho circular ou das espirais):

➤ **Estaca na intertangente** ($km_{EST} \geq km_{ETi-1}$ e $km_{EST} \leq km_{TE}$) (em curva circular substituir TE por PC):

$$R_{EST} = \infty \quad (48)$$

$$AZ_{EST} = AZ_{TE} \quad (49)$$

$$x_{EST} = x_{TE} + (km_{EST} - km_{TE}) \times \text{sen}(AZ_{TE}) \quad (50)$$

$$y_{EST} = y_{TE} + (km_{EST} - km_{TE}) \times \text{cos}(AZ_{TE}) \quad (51)$$

➤ **Estaca no 1º ramo da espiral** ($km_{EST} < km_{EC}$):

$$s = \frac{(km_{EST} - km_{TE})^2}{2 \times R_{PI} \times lc_{PI}} \quad (52)$$

$$x = (km_{EST} - km_{TE}) \times \frac{s}{3} \times \left(1 - \frac{s^2}{14} + \frac{s^4}{440}\right) \quad (53)$$

$$y = (km_{EST} - km_{TE}) \times \left(1 - \frac{s^2}{10} + \frac{s^4}{216}\right) \quad (54)$$

$$d = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (55)$$

$$R_{EST} = \frac{R_{PI} \times Lc_{PI}}{km_{EST} - km_{TE}} \quad (56)$$

$$Az_{EST} = Az_{TE} + Lado \times s \quad (57)$$

$$x_{EST} = x_{TE} + d \times \text{sen} \left[Az_{TE} + Lado \times \text{atan} \left(\frac{x}{y} \right) \right] \quad (58)$$

$$y_{EST} = y_{TE} + d \times \text{cos} \left[Az_{TE} + Lado \times \text{atan} \left(\frac{x}{y} \right) \right] \quad (59)$$

- **Estaca na parte circular** ($km_{EC} < km_{EST} < km_{CE}$ –curva composta–; ou $km_{PC} < km_{EST} < km_{PT}$ –curva simples–, substituindo nas expressões EC e TE por PC, com $Sc_{PI} = 0$):

$$a = \frac{(km_{EST} - km_{EC})}{R_{PI}} \quad (60)$$

$$d = 2 \times R_{PI} \times \text{sen} \left(\frac{a}{2} \right) \quad (61)$$

$$R_{EST} = R_{PI} \quad (62)$$

$$Az_{EST} = Az_{TE} + Lado \times (Sc_{PI} + a) \quad (63)$$

$$x_{EST} = x_{EC} + d \times \text{sen} \left[Az_{ET} + Lado \times \left(Sc_{PI} + \frac{a}{2} \right) \right] \quad (64)$$

$$y_{EST} = y_{EC} + d \times \text{cos} \left[Az_{ET} + Lado \times \left(Sc_{PI} + \frac{a}{2} \right) \right] \quad (65)$$

- **Estaca no 2º ramo da espiral** ($km_{CE} < km_{EST} < km_{ET}$):

$$s = \frac{(km_{ET} - km_{EST})^2}{2 \times R_{PI} \times lc_{PI}} \quad (67)$$

$$x = (km_{ET} - km_{EST}) \times \frac{s}{3} \times \left(1 - \frac{s^2}{14} + \frac{s^4}{440}\right) \quad (68)$$

$$y = (km_{ET} - km_{EST}) \times \left(1 - \frac{s^2}{10} + \frac{s^4}{216}\right) \quad (69)$$

$$d = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (70)$$

$$R_{EST} = \frac{R_{PI} \times L_{C_{PI}}}{km_{ET} - km_{EST}} \quad (71)$$

$$Az_{EST} = Az_{TE} - Lado \times s \quad (72)$$

$$x_{EST} = x_{ET} - d \times \text{sen} \left[Az_{ET} - Lado \times \text{atan} \left(\frac{x}{y} \right) \right] \quad (73)$$

$$y_{EST} = y_{ET} - d \times \text{cos} \left[Az_{ET} - Lado \times \text{atan} \left(\frac{x}{y} \right) \right] \quad (74)$$

Onde:

R = raio da estaca ou do PI corrente (m).

Az = azimute da estaca ou dos pontos notáveis do PI corrente (rad).

x e y = coordenadas geográficas das estacas, dos pontos notáveis do PI corrente ou temporárias (m).

s = ângulo parcial da parte em espiral da curva de transição do PI corrente (rad).

d = variável linear temporária (m).

a = variável angular temporária (rad).

ΔPI_a e ΔPI_p = distância entre PI corrente e anterior, e entre PI corrente e posterior (m).

$l_{C_{PI}}$ = comprimento da transição do PI corrente (m).

T_{PI} = tangente da curva (circular ou composta) do PI corrente (m).

Sc_{PI} = ângulo da parte em espiral da curva composta do PI corrente (rad).

$X_{C_{PI}}$ e $Y_{C_{PI}}$ = coordenadas retangulares dos pontos osculadores das curvas de transição do PI corrente (m).

$Lado$ = considerar -1 para inflexão à esquerda e +1 para à direita para PI corrente.

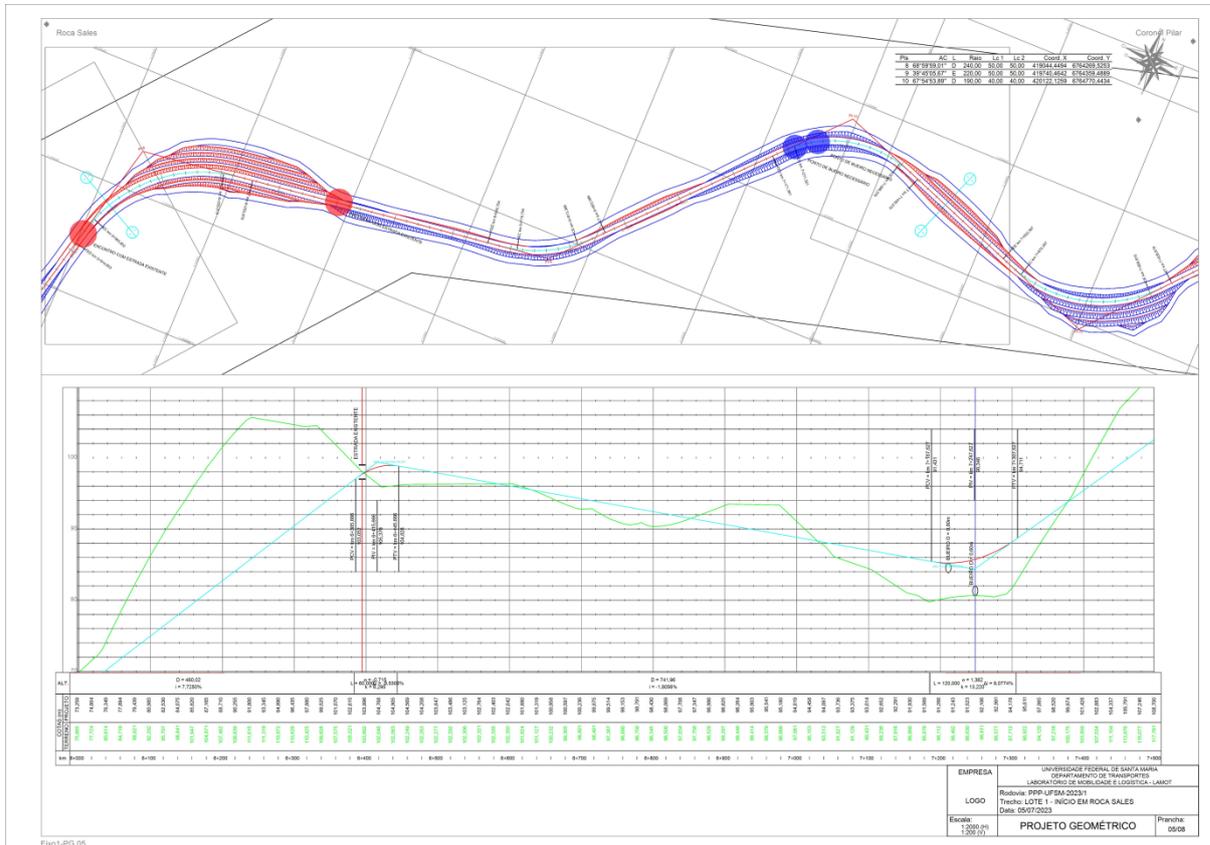
$i-1$ e $i+1$ = indicação para PI anterior ou posterior.

3.3.4. Desenho planimétrico

O desenho planimétrico, em pranchas para o projeto executivo, geralmente é apresentado na escala 1:2000 (1500 metros em uma prancha A1) ou 1:1000 (750 metros em uma prancha A1), e também pode ser impresso em folhas no formato A3, mantendo a metade da escala original. Isso significa que as distâncias mencionadas anteriormente serão preservadas mesmo em uma folha de tamanho reduzido. A Figura 52 ilustra um exemplo de prancha de projeto executivo de uma rodovia, onde, na parte superior, apresenta-se o projeto planimétrico, que inclui, além do desenho em planta com destaque aos pontos notáveis das curvas, uma tabela

com as informações dos elementos fundamentais das curvas contidas na prancha e as coordenadas dos pontos de inflexão.

Figura 52: Prancha de projeto executivo.



Fonte: Autores.

3.4. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS PLANIMÉTRICAS

Com o intuito de poder comparar projetos planimétricos diferentes, como alternativas para um mesmo trecho ou até trechos distintos, costumam-se definir características técnicas padronizadas que medem determinados aspectos do projeto. Para o caso da planimetria, as características técnicas mais conhecidas são detalhadas a seguir.

3.4.1. Acréscimo sobre a diretriz

Calcula-se o acréscimo sobre a diretriz pela razão entre a extensão total do trecho rodoviário e a distância em linha reta entre as coordenadas x e y do Ponto de Partida e o Ponto Final (diretriz). Desconta-se uma unidade para fins de indicar somente a parcela do acréscimo.

O valor final é multiplicado por 100 para que o resultado seja expresso em porcentagem, conforme a Equação 75:

$$A = \left(\frac{E}{D} - 1 \right) \times 100 \quad (75)$$

Onde:

A = Acréscimo sobre a diretriz (%).

E = Extensão total do trecho (m).

D = Distância em diretriz (m).

3.4.2. Tortuosidade

A tortuosidade é um aspecto geométrico vinculado às curvas horizontais e está diretamente ligada ao conforto e segurança dos usuários da via. O cálculo é diferente segundo a curva seja circular simples ou composta com transições.

3.4.2.1. Tortuosidade em curva circular simples

É a proporção entre o ângulo central da curva e o raio da mesma. Pode-se obter o valor através da Equação 76:

$$Tc = \frac{AC}{R} \quad (76)$$

Onde:

Tc = tortuosidade em curva circular simples (°/m).

AC = ângulo central da curva (° decimais).

R = raio da curva (m).

3.4.2.2. Tortuosidade em curva com transição

A tortuosidade em curva de transição pode ser calculada através da Equação 77, fazendo uso dos valores do ângulo de transição e do ângulo central do trecho circular, obtidos nas Equações 16 e 17 do presente capítulo:

$$Tt = \frac{\theta + \frac{(Sc_1 + Sc_2)}{3}}{R} \quad (77)$$

Onde:

Tt = tortuosidade em curva de transição (°/m).

θ = ângulo central do trecho circular (° decimais).

S_{c_1} = ângulo da transição na entrada da curva ($^{\circ}$ decimais).

S_{c_2} = ângulo da transição na saída da curva ($^{\circ}$ decimais), normalmente igual ao anterior.

R = raio da curva (m).

3.4.2.3. Tortuosidade Total

A tortuosidade total de um trecho rodoviário é obtida através do somatório de todas as tortuosidades das curvas que compõe o projeto. A Equação 78 retorna esse valor:

$$T_{TOT} = \sum_{i=0}^n T_{c_i} + \sum_{j=0}^m T_{t_j} \quad (78)$$

Onde:

T_{TOT} = tortuosidade total ($^{\circ}/m$).

T_{c_i} = tortuosidade na curva circular simples i ($^{\circ}/m$).

T_{t_j} = tortuosidade na curva de transição j ($^{\circ}/m$).

3.4.2.4. Tortuosidade Média

Finalmente, a tortuosidade média é obtida pela proporção entre a tortuosidade total e a extensão do trecho em quilômetros. A Equação 79 retorna esse valor em $^{\circ}/m.km$ e permite definir o quão sinuoso é o trecho viário, assim como comparar com outros projetos de extensões e número de curvas diferentes. Quanto menor for esse valor, melhor será a alternativa de projeto planimétrico.

$$T_{med} = \frac{T_{TOT}}{E} \quad (79)$$

Onde:

T_{med} = Tortuosidade Média ($^{\circ}/m.km$).

T_{TOT} = Tortuosidade Total ($^{\circ}/m$).

E = extensão do trecho (km).

3.5. EXERCÍCIOS

I. Dados os 5 vértices de uma poligonal aberta:

- P1(2575,005 m; 925,000 m).
- P2(3407,250 m; 1505,700 m).
- P3(4584,010 m; 2000,000 m).



- P4(3980,000 m; 925,000 m).
- P5(5000,000 m; 205,000 m).

Calcule os rumos, azimutes e deflexões.

Resposta:

	P1	P2	P3	P4
Rumo	55°05'40,36" NE	67°12'51,28" NE	29°19'49,14" SO	54°46'56,677" SE
Azimute	55°05'40,36"	67°12'54,28"	209°19'49,10"	125°13'03,33"
Deflexão		12°07'13,92" D	142°06'54,86" D	84°06'45,81" E

II. Preencher a planilha da poligonal aberta para os pontos de inflexão da Tabela 7:

Tabela 7: Exercício de poligonal aberta.

PI	COORDENADAS	
	x	y
PP	367127,495	6940777,674
1	367765,239	6941271,925
2	367281,617	6941511,079
3	367090,294	6941202,836
PF	366532,268	6941612,055

Fonte: Autores.

Resposta:

Ponto de inflexão				Alinhamento				Projeções				Coordenadas	
Nº	Est. ou km	Deflexão	Lado	Azimute	Rumo (° ' ")	Q	Comprimento (m)	Leste (+)	Oeste (-)	Norte (+)	Sul (-)	x	y
PP	0+000,000											367127,495	6940777,674
1	0+806,847	115° 54' 42,03"	E	52° 13' 27,66"	52° 13' 27,66"	NE	806,847	637,744		494,251		367765,239	6941271,925
2	1+346,369	84° 29' 06,93"	E	296° 18' 45,62"	63° 41' 14,38"	NO	539,523		483,622	239,154		367281,617	6941511,079
3	1+709,162	94° 25' 35,11"	D	211° 49' 38,69"	31° 49' 38,69"	SO	362,792		191,323		308,243	367090,294	6941202,836
PF	2+401,154			306° 15' 13,80"	53° 44' 46,20"	NO	691,992		558,026	409,219		366532,268	6941612,055

III. Com base na planilha de coordenadas apresentada na Figura 53, de um trecho de rodovia de Classe II em região plana:

- A) Determine o azimute do alinhamento entre os PIs 2 e 3.
- B) Determine o azimute do alinhamento entre os PIs 5 e 6.
- C) Determine a deflexão do PI 2.
- D) Determine a deflexão do PI 5.
- E) Identifique uma inconformidade planimétrica no projeto.
- F) Determine o desenvolvimento circular da curva relativa ao PI 5.
- G) Determine a tangente da curva relativa ao PI 4.
- H) Determine a coordenada X do CE da curva do PI 6.
- I) Determine a coordenada Y do EC da curva do PI 7.
- J) Determine a coordenada X da estaca 4+800.

Figura 53: Exercício sobre planilha de coordenadas planimétricas.

PI	ESTAQUEAMENTO (Est. ou km)				PARÂMETROS DA CURVA								
	PC ou TE	EC	CE	PT ou ET	AC (°''')		R (m)	Lc1 (m)	Lc2 (m)	Dc (m)	T1 (m)	T2 (m)	
PP				0+000,000									
1	1+935,416	2+045,416	102,3	2+212,376	31°53'13,51"	E	300	110	110	56,96	141,122	141,122	
2	?	?	?	?	?	?	350	120	120	?	?	?	
3	5+128,343	5+248,343	419,6	5+539,657	?	?	400	?	?	171,314	212,982	212,982	
4	5+465,425	5+585,425	686,3	5+806,326	36°09'43,29"	E	350	120	120	100,901	?	?	
5	?	?	?	?	?	?	300	110	110	?	?	?	
6	8+213,921	?	?	8+489,948	25°32'31,59"	E	350	120	120	36,028	139,662	139,662	
7	9+000,311	9+110,311	170,4	9+280,412	32°29'12,88"	D	300	?	?	60,101	142,832	142,832	
PF	9+707,426												

PI	ALINHAMENTO			COORDENADAS	
	Az (°''')	IntTan (m)	ΔPI (m)	X (m)	Y (m)
PP	75°13'17,77"	?	?	504017,0029	6691602,702
1	43°20'04,25"	1993,985	2294,279	506024,8481	6692132,388
2	?	?	?	507599,312	6693801,153
3	116°34'25,10"	-74,232	313,52	508546,821	6694057,77
4	80°24'41,81"	596,304	936,814	508827,2205	6693917,518
5	?	?	?	509750,9471	6694073,562
6	14°32'04,04"	510,362	792,856	510906,9082	6695447,45
7	47°01'16,91"	?	?	511105,8851	6696214,933
PF				511522,789	6696603,411

Fonte: Autores.

Resposta:

- A) 74° 50' 45,36"
- B) 40° 04' 35,63"
- C) 31° 30' 41,10" D
- D) 40° 20' 06,19" E
- E) IntTan Negativa entre PI-3 e PI-4
- F) 101,194 m
- G) 174,770 m
- H) 510.905,30706885 m

I) 6.696.181,11075559 m

J) 508.024,3195 m.

IV. Seja a planilha de coordenadas do projeto planimétrico de uma rodovia de classe III em região de relevo montanhoso representada na Figura 54. Com base nos dados planimétricos apresentados:

- Preencha a tabela, sabendo que as curvas que por norma possam ser simples, serão projetadas como circulares sem transição.
- Calcule o Acréscimo sobre a diretriz.
- Calcule a Tortuosidade total do trecho.
- Calcule a Tortuosidade média do trecho.

Figura 54: Exercício sobre planilha de coordenadas planimétricas

PI	Estaqueamento				Parâmetros da curva						
	PC ou TE	EC	CE	PT ou ET	AC(°''')	R(m)	Lc1(m)	Lc2(m)	Dc(m)	T1(m)	T2(m)
PP				0+000,00							
1					124°58'29,21"	100					
2					5°38'58,99"	300					
3					83°42'43,16"	250					
4					49°06'14,19"	250					
5					36°53'48,83"	400					
6					49°52'23,55"	150					
7					127°12'35,16"	200					
PF											

PI	Alinhamento			Coordenadas	
	Az(°''')	IntTan (m)	ΔPI (m)	X(m)	Y(m)
PP	171°33'10,92"			493367,200	6668510,200
1	46°34'41,71"			493529,100	6667420,000
2	40°55'42,72"			493735,150	6667615,000
3	124°38'25,89"			493962,330	6667877,000
4	75°32'11,70"			494728,000	6667348,000
5	112°26'00,53"			495232,000	6667478,000
6	62°33'36,98"			496150,000	6667099,000
7	189°46'12,14"			496670,000	6667369,000
PF				496483,000	6666283,000

Fonte: Autores.

Resposta:

A)

PI	Estaqueamento				Parâmetros da curva						
	PC ou TE	EC	CE	PT ou ET	AC(°''')	R(m)	Lc1(m)	Lc2(m)	Dc(m)	T1(m)	T2(m)
PP				0+000,000							
1	0+877,380	0+937,380	1+095,502	1+155,502	124°58'29,21"	100	60,000	60,000	158,122	224,776	224,776
2	1+199,616			1+229,198	5°38'58,99"	300			29,582	14,803	14,803
3	1+285,782	1+385,782	1+651,045	1+751,045	83°42'43,16"	250	100,000	100,000	265,262	275,390	275,390
4	2+241,396	2+341,396	2+455,652	2+555,652	49°06'14,19"	250	100,000	100,000	114,256	164,899	164,899
5	2+777,811			3+035,400	36°53'48,83"	400			257,589	133,438	133,438
6	3+784,647	3+864,647	3+915,214	3+995,214	49°52'23,55"	150	80,000	80,000	50,568	110,474	110,474
7	4+019,357	4+109,357	4+463,403	4+553,403	127°12'35,16"	200	90,000	90,000	354,046	451,302	451,302
PF	5+204,083										

<i>PI</i>	Alinhamento			Coordenadas	
	Az(°''')	IntTan (m)	ΔPI (m)	X(m)	Y(m)
PP	171°33'10,92"	877,380	1102,156	493367,2	6668510,2
1	46°34'41,71"	44,114	283,693	493529,1	6667420
2	40°55'42,72"	56,585	346,778	493735,15	6667615
3	124°38'25,89"	490,351	930,64	493962,33	6667877
4	75°32'11,70"	222,159	520,496	494728	6667348
5	112°26'00,53"	749,247	993,159	495232	6667478
6	62°33'36,98"	24,142	585,918	496150	6667099
7	189°46'12,14"	650,680	1101,982	496670	6667369
PF				496483	6666283

B) 35,90%

C) 2,2875 °/m

D) 0,4395 °/m.km.

4. ALTIMETRIA

A altimetria é o estudo das variações de altitude ao longo do traçado de uma rodovia. Ela desempenha um papel fundamental no estudo do projeto geométrico de uma estrada, pois por meio dela é possível determinar o perfil longitudinal da via, identificar aclives e declives (Figura 55), calcular cotas e definir os trechos de corte e aterro necessários para o nivelamento da estrada. Esses dados são cruciais para o projeto, construção e manutenção de rodovias seguras e eficientes, permitindo a adequada drenagem de água, a prevenção de acidentes relacionados a desníveis acentuados ou pontos de visibilidade reduzida e o planejamento adequado de obras de arte, como muros de arrimo, pontes e viadutos.

Figura 55: Rodovia em rampa.



Fonte: GOUW. Disponível em: <<https://www.pexels.com/pt-br/foto/estrada-secundaria-vazia-com-nevoeiro-24821/>>. Acesso em: 20 set. 2023.

Portanto, o projeto altimétrico, também denominado de greide ou projeto em perfil longitudinal, representa a rodovia em um sistema de coordenadas cartesiano em que as abscissas contêm o estaqueamento da rodovia, ou seja, a posição de cada ponto do eixo da rodovia em relação ao ponto de partida (PP), e em ordenadas a cota ou coordenada Z em cada ponto, tanto

para o terreno como para a própria rodovia. É importante destacar que a escala do eixo de ordenadas costuma ser deformada em relação ao eixo de abscissas, para facilitar a visualização das variações de greide, que são muito menores quando comparadas às distâncias percorridas ao longo do eixo. Assim, normalmente a escala do eixo vertical é 10 vezes a do eixo horizontal.

4.1. LANÇAMENTO DAS RAMPAS DO PROJETO ALTIMÉTRICO

O greide é composto por rampas, ou trechos com inclinação constante, e curvas verticais que realizam a concordância no perfil entre as rampas consecutivas. Essas inclinações são calculadas como a taxa de variação vertical (diferença de cotas) em relação à distância horizontal percorrida ao longo de um trecho da via (diferença entre estacas).

As rampas podem ser classificadas em três tipos:

- **Actives:** trechos com inclinação com sinal positivo (crescente no sentido do estaqueamento ou quilometragem).
- **Declives:** trechos com inclinação com sinal negativo (decrecente no sentido do estaqueamento ou quilometragem).
- **Em nível:** inclinação com valor igual a zero, ou seja, plana.

Para a realização de um projeto altimétrico correto, deve-se obedecer a alguns **critérios**. Nessa seção são apresentados quatorze critérios para a realização deste. É importante destacar que alguns desses critérios podem entrar em conflito entre si ao serem aplicados, porém um bom projeto deve considerar e otimizar o conjunto como um todo.

4.1.1. Minimização das inclinações

A utilização de rampas suaves com taxas compatíveis com a intensidade do uso da via e o investimento previsto é essencial para a realização de um projeto eficiente. Sempre que possível, deve-se projetar rampas com a menor inclinação, para a garantia da segurança, do conforto do usuário e de uma boa acessibilidade da via. Porém, em alguns casos, restrições topográficas, de espaço ou outros fatores podem limitar a possibilidade da adoção dessas rampas em determinados trechos da rodovia (Figura 56). Nesses casos, é necessário realizar um estudo minucioso que busque um equilíbrio entre os objetivos de segurança, custo e viabilidade técnica do projeto.

Figura 56: Trecho rodoviário com rampa acentuada.



Fonte: CIUFFO. Disponível em: <<https://www.flickr.com/photos/leandrociuffo/8155785477>>. Acesso em: 20 set. 2023

4.1.2. Rampa máxima

Refere-se à inclinação máxima permitida em uma rodovia. É definida para o veículo do projeto (veículo de carga) e seu valor, expresso em porcentagem, está limitado pela Norma de Projeto Geométrico de Rodovias em função da classe de projeto e de relevo, podendo ser observado na Tabela 8. É possível perceber que a restrição de inclinação das rampas é maior quanto mais elevada é a classificação técnica da rodovia, assim como quanto menores são as restrições do relevo. Assim, é fundamental uma escolha adequada dessa classificação para permitir uma adaptação da rodovia ao terreno, levando em conta as necessidades de movimentação de terras ou de obras de arte especiais, mas também para não gerar problemas na operação da rodovia de acordo com o volume esperado de veículos, sobretudo dos pesados, cujo desempenho em rampas acentuadas é menor.

Tabela 8: Rampas máximas.

Classe do projeto	Relevo		
	Plano	Ondulado	Montanhoso
Classe 0	3%	4%	5%
Classe I	3%	4,5%	6%
Classe II	3%	5%	7%
Classe III	4%	6%	8%
Classe IV-A	4%	6%	8%
Classe IV-B	6%	8%	10%*

Fonte: DNER, 1999, página 124.

4.1.3. Rampa Mínima

Do mesmo modo que existem valores máximos para as rampas, também há recomendações para a inclinação mínima em uma rodovia. A definição da rampa mínima é importante para garantir o escoamento adequado da água da chuva, permitindo uma drenagem eficiente e evitando problemas futuros que podem vir a comprometer a segurança do usuário, como o aquaplanagem (Figura 57), ou até comprometer a infraestrutura da plataforma de terraplenagem e de pavimentação por acúmulo de água.

Figura 57: Rampa mínima.



Fonte: NPS. Disponível em: <<https://www.nps.gov/dewa/learn/news/us-route-209-to-close-through-park.htm>>.

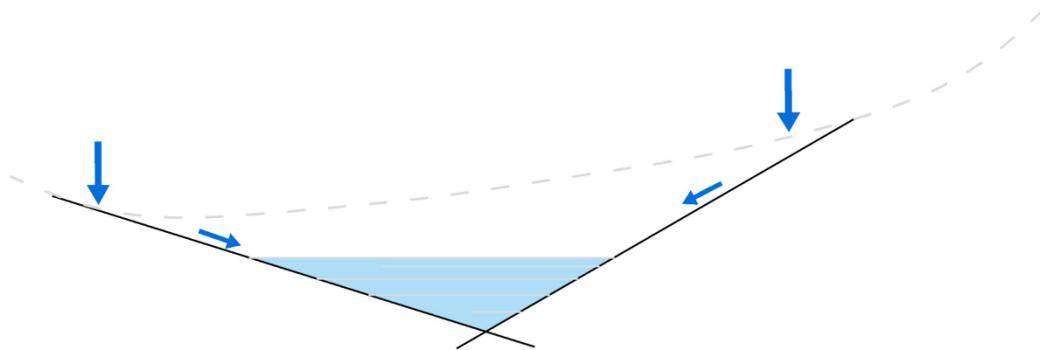
Acesso em: 20 set de 2023.

A limitação de rampa mínima, portanto, é aplicável nos trechos em corte ou seção mista, onde a evacuação das águas é mais difícil, de modo que o valor mínimo desejável é estabelecido em $\pm 1\%$ e o admissível $\pm 0,3\%$ para a viabilizar um escoamento eficiente nesses casos. Em caso de rodovias já existentes, os valores devem ser também compatíveis com os acessos às instalações marginais.

4.1.4. Curvas em cortes

Nas extensões de cortes ou seções mistas, não é recomendável a utilização de curvas côncavas por vários fatores. As curvas côncavas, quando utilizadas em seções de corte comprometem a estabilidade dos taludes, aumentando a possibilidade de deslizamentos de solo, especialmente em terrenos com solos menos coesivos ou sujeitos à erosão. Além disso, elas comprometem a drenagem eficiente da via, permitindo que a água da chuva se acumule nas concavidades e crie problemas de infiltração, erosão e aquaplanagem, que comprometem a segurança estrutural da via e do usuário. Portanto, deve-se evitar a todo custo estes pontos.

Figura 58: Acúmulo indesejável de água em curvas côncavas em cortes.



Fonte: Autores.

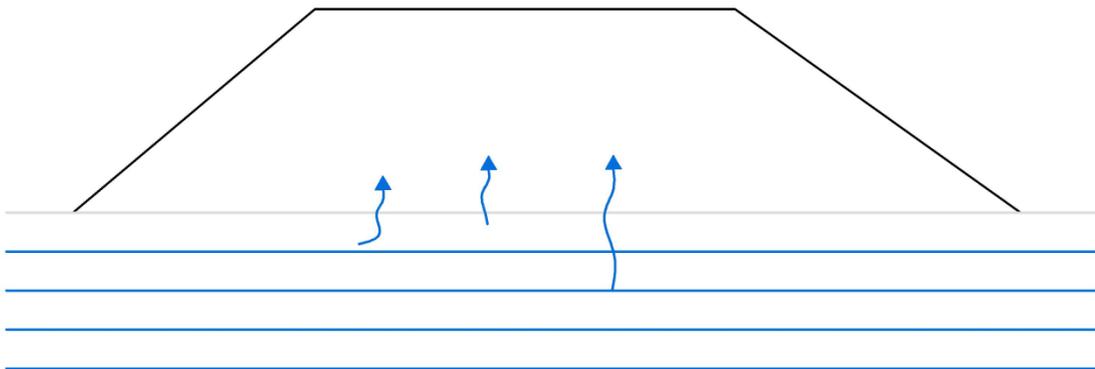
4.1.5. Terrenos alagadiços

Em princípio, é recomendável evitar terrenos saturados e extensões com solo moles em projetos de rodovias. Porém, caso não seja possível evitá-los, deve-se prever sempre projetar a rodovia em aterros com altura média mínima de 1,50 metros para a preservação do pavimento contra o fenômeno de ascensão capilar da água.

Esse fenômeno ocorre quando a água do solo se desloca para cima, por meio de pequenos espaços entre os materiais de pavimentação. Isso pode levar a problemas como a

deterioração do pavimento, formação de poças e até mesmo a comprometer a estabilidade da estrada. Porém, o estabelecimento da altura mínima de 1,50 metros para aterros nessa condição, busca criar uma camada de solo mais seco e resistente, diminuindo o risco do surgimento desse fenômeno e seus efeitos negativos. Além disso, será fundamental prever as obras de drenagem superficial e subterrânea necessárias para facilitar a evacuação das águas naturalmente presentes nessas áreas.

Figura 59: Aterro sobre solos moles.



Fonte: Autores.

4.1.6. Otimização das massas

Ao posicionar a linha de projeto em perfil, é de suma importância buscar um equilíbrio adequado entre os volumes de corte e aterro gerados. Esse equilíbrio é alcançado considerando os fatores de homogeneização, que são estudados no projeto de terraplenagem da rodovia a partir das características geológicas das terras. Assim, deve-se levar em conta a relação entre o volume geométrico no corte (volume de terra a ser removido) e o volume compensado no aterro (volume de terra a ser adicionado). Na falta de estudos ou informações detalhadas, é comumente adotada a relação de 1 metro cúbico (m^3) de aterro compactado é equivalente a 1,3 m^3 de corte.

Essa relação permite estabelecer uma compensação adequada entre os volumes de corte e aterro, levando em consideração as características topográficas, geotécnicas e do uso do terreno. O objetivo é minimizar a necessidade de movimentação excessiva de terra, otimizando os custos do projeto e reduzindo o impacto no entorno, assim como evitar a necessidade de descartar volumes elevados de terra ou de adquirir grandes quantidades de material de empréstimo para compensar os volumes internos do projeto.

4.1.7. Cortes e aterros elevados

Devido à necessidade de fundação para os aterros e estabilidade das encostas nos maciços de terra projetados na rodovia, é aconselhável evitar a utilização de cortes e aterros de grande altura (Figura 60). Dependendo das características específicas de cada projeto, de considerações ambientais e de questões econômicas, pode ser recomendada a utilização de estruturas especiais, como viadutos ou túneis.

Figura 60: Corte alto.



Fonte: Vitruvius. Disponível em: <<https://vitruvius.com.br/revistas/read/drops/14.078/5094>>. Acesso em: 20 set 2023.

Para rodovias de Classe I ou II de região montanhosa recomenda-se a altura máxima de até 18 metros. Para outras classes esse valor é de 12 metros. No entanto, essas dimensões dependem diretamente das características geológicas e geotécnicas dos materiais envolvidos na formação dos maciços de corte e aterro, assim como outras condicionantes ambientais ou do uso do solo adjacente. Além disso, no caso de vias urbanas, a recomendação é considerar as cotas das soleiras das residências existentes e demais restrições derivadas do entorno urbano.

4.1.8. Bueiros

É recomendado evitar o tráfego direto sobre as paredes e lajes de concreto de bueiros tubulares e galerias, pois representam corpos mais rígidos que as terras utilizadas para conformar a plataforma de terraplenagem. Assim, para evitar quebras nesses elementos ou assentamentos nas áreas adjacentes devido a essa diferença de flexibilidade, essas estruturas devem ser cobertas com uma camada mínima de 50 a 60 cm de solo selecionado compactado, que permita a distribuição adequada das cargas do tráfego. Assim, no caso de bueiros, é necessário considerar no projeto do greide a dimensão do próprio bueiro e o recobrimento de aterro mínimo, a partir da cota do terreno natural, para evitar afundamentos da obra de drenagem e ineficiência no escoamento das águas (Figuras 61 e 62).

Figura 61: Bueiro com recobrimento insuficiente.



Fonte: DNIT. Disponível em: <<https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/portais-tematicos/br-319-am-ro/noticias/dnit-executa-hidrossemeadura-em-taludes-da-rodovia-br-319-apos-servicos-de-implantacao-de-bueiro-e-conformacao-de-estruturas-da-via>>. Acesso em: 20 set. 2023

Figura 62: Bueiro com recobrimento necessário.



Fonte: Prefeitura de Castanheira – MT. Disponível em: <<https://www.castanheira.mt.gov.br/noticia/1095/novos-bueiros-tubulares-mineirinho-e-jandir-fazem-balanco>>. Acesso em: 20 set. 2023.

4.1.9. Características geológicas

A realização de sondagens preliminares ao longo do eixo de um projeto possibilita obter informações detalhadas sobre o perfil geológico do trajeto. Esses dados são de extrema importância, pois permitem tomar decisões embasadas e evitar cortes desnecessários em formações rochosas, bem como minimizar as alterações nas características da rocha ao longo do percurso e a passagem por terrenos de capacidade de suporte inadequada. Ao aproveitar essas informações, é possível otimizar o planejamento e a execução do projeto, garantindo maior estabilidade para a infraestrutura e menores custos, assim como reduzir potenciais impactos ambientais.

4.1.10. Impulso

Ao projetar aclives longos, é recomendável posicionar as rampas mais íngremes na parte inferior do trecho e as mais suaves no topo. Essa estratégia busca aproveitar o impulso acumulado pelo veículo durante o segmento anterior de declive. Ao permitir que o veículo mantenha parte de sua energia cinética, as rampas mais íngremes no início do aclive facilitam a sua progressão inicial, enquanto as rampas mais suaves no topo permitem uma transição

gradual e menos exigente em termos de energia. Essa abordagem visa otimizar o desempenho e a eficiência do veículo ao longo do aclave, proporcionando uma experiência de condução mais suave e econômica.

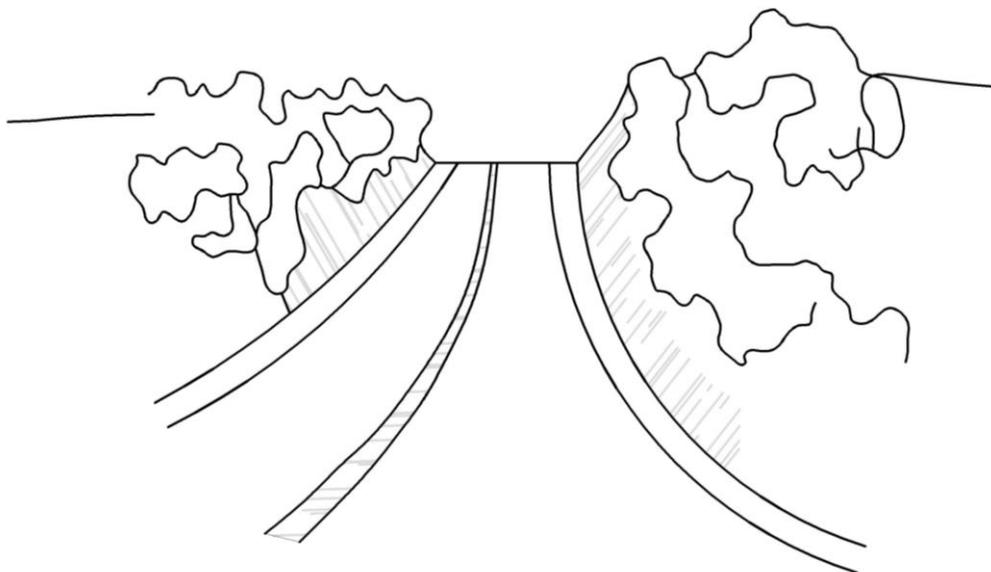
4.1.11. Perfil de terraplenagem

Ao realizar o lançamento de rampas e projetar curvas verticais, é essencial considerar que a linha de projeto corresponde ao perfil de terraplenagem. É a partir dessa linha que a estrutura do pavimento será projetada e construída. Ao alinhar o projeto com o perfil de terraplenagem, garante-se que a estrutura do pavimento seja adequadamente dimensionada e posicionada, levando em conta as características do terreno e a topografia do local, mas ao mesmo tempo deve-se considerar os acessos à vias ou propriedades adjacentes.

4.1.12. Harmonia entre planimetria a altimetria

É de suma importância que haja harmonia entre o projeto horizontal e vertical. Em uma situação em que uma lombada é superada apenas com uma curva vertical bem dimensionada, mas não coordenada com a planta da rodovia, os motoristas podem sentir-se inseguros pela falta de visibilidade após o fim do aclave, e são levados a reduzir a velocidade (Figura 63).

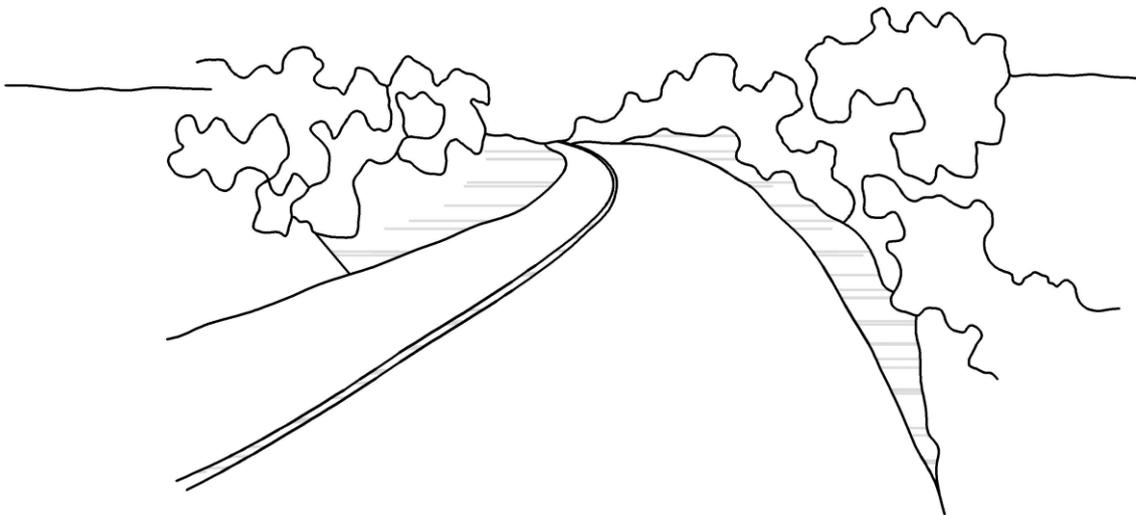
Figura 63: Curvas verticais sem coordenação com trechos de curvas horizontais.



Fonte: Autores.

No entanto, quando a lombada é superada por meio de uma combinação de curvas horizontais e verticais, as áreas marginais auxiliam na percepção visual e facilitam a abertura de visibilidade da estrada enquanto o motorista avança. Portanto, sempre que possível, é recomendado que as curvas verticais coincidam com trechos de curvas horizontais (Figura 64), resultando em uma estética tridimensional mais agradável.

Figura 64: Curvas verticais coincidentes com trechos de curvas horizontais.



Fonte: Autores.

Dessa forma, é conveniente que a curva horizontal comece antes da curva vertical, como uma forma de anunciar ao usuário a configuração do traçado, proporcionando uma experiência de condução mais segura e intuitiva.

4.1.13. Pontos obrigatórios de passagem

No projeto altimétrico existem diversas condicionantes que devem ser consideradas, sendo uma delas os pontos obrigatórios de passagem. Esses pontos são locais específicos ao longo do trajeto onde é necessário atender a certas exigências, como adequar a inclinação da via, garantir a altura mínima para a passagem de veículos ou cumprir normas de segurança.

Entre os principais pontos obrigatórios de passagem, destacam-se os seguintes pelas implicações derivadas no projeto altimétrico da rodovia:

- Cruzamento com outras vias e acesso a empreendimentos adjacentes e lotes lindeiros (máximo 1 m de diferença entre as cotas delas e a do greide da nova rodovia, para viabilizar o projeto de interseção ou acesso correspondente).
- Passagens superiores (pontes, viadutos) e passagens inferiores (túneis, galerias), nas quais o greide deve coincidir exatamente com as estruturas existentes.
- Altura dos elementos urbanos (passarelas, fios elétricos, semáforos) e de outras infraestruturas (linhas de alta tensão, cruzamento com ferrovias, etc.), para garantir o gabarito mínimo para passagem dos veículos em segurança. No caso de passagem sobre rodovias federais (sem interseção), deve ser respeitado um vão livre mínimo de 5,50 m, enquanto que para passagem sobre ferrovias, este deve ser de mínimo 7,20 m.
- Cota de cheia máxima dos rios (considerando um mínimo de 2,50 metros acima dessa cota, ou outras determinações do órgão ambiental).

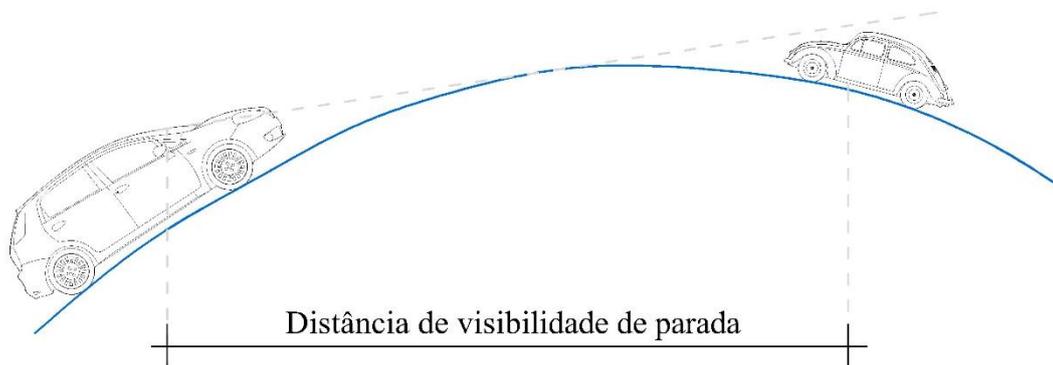
4.1.14. Visibilidade

Finalmente, é fundamental garantir amplas condições de visibilidade em um projeto de rodovia. Para isso, a diferença entre as rampas deve ser a menor possível, para reduzir as áreas em que os motoristas não conseguem visualizar a própria rodovia à frente, seu entorno e os demais usuários. No projeto geométrico, existem duas distâncias de visibilidade que devem ser consideradas:

- A distância mínima de visibilidade de parada, que é imprescindível respeitar, definida como a distância necessária para que um veículo em velocidade adequada possa parar em tempo de evitar uma colisão com um obstáculo à frente. No caso do projeto altimétrico, o comprimento das curvas de concordância vertical limita esta visibilidade (Figura 65), de modo que o projeto das mesmas precisa obedecer este critério, como será abordado na seção seguinte.
- A distância mínima de ultrapassagem, necessária para que um veículo possa realizar essa manobra em condições de segurança, considerando as diferentes etapas de decisão, de aproximação ao veículo na frente, de passagem em paralelo a ele, e retorno à própria faixa (Tabela 9). Muitas vezes esta distância não é alcançável no projeto geométrico, devido a restrições do terreno ou do entorno, o que exige demarcar o trecho viário com restrição a ultrapassagem no projeto de sinalização. Isso pode ser feito por meio da colocação de placas de sinalização adequadas e marcações no pavimento, informando aos motoristas que a ultrapassagem é proibida em determinada área. Porém, é

importante verificar que existam trechos suficientes para que essas manobras sejam possíveis, pois no caso contrário os usuários podem ficar impacientes atrás de um veículo lento e tentarem realizar manobras arriscadas.

Figura 65: Limitação de visibilidade de parada por concordância vertical.



Fonte: Autores.

Tabela 9: Distância mínima de ultrapassagem.

Velocidade diretriz (km/h)	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
Distância de visibilidade de ultrapassagem (m)	180	270	350	420	490	560	620	680	730	800

Fonte: DNER, 1999, página 60.

4.2. PROJETO DAS CURVAS DE CONCORDÂNCIA VERTICAL

4.2.1. Caracterização geométrica das curvas de concordância vertical

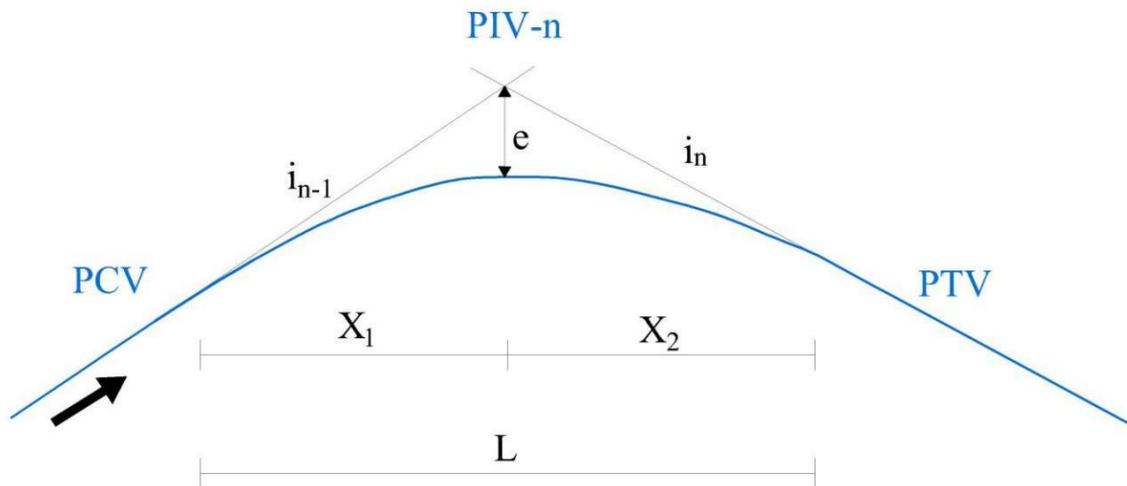
O projeto do eixo de uma rodovia em vista longitudinal é composto por rampas, ascendentes ou descendentes, que devem ser concordadas por curvas verticais. Essas curvas unem de modo agradável e seguro as rampas consecutivas. Visando a suavização dos efeitos de transição de uma inclinação para outra, diversas curvas podem ser empregadas, tendo sido testadas ao longo da história da técnica rodoviária algumas como a parábola do 2º grau, a curva circular, a elipse e a curva parábola cúbica. Porém, a curva de concordância vertical que mais se adapta às necessidades atuais de projeto é a parábola de 2º grau, pois ela apresenta a propriedade de que a variação da inclinação nela em relação à distância percorrida é constante. Isso é fácil de perceber de forma analítica, pois uma parábola adota a forma de uma equação de

segundo grau, na qual a inclinação em cada ponto pode ser calculada como a derivada dela em função do espaço, que segue então uma função linear. A variação dessa inclinação seria a segunda derivada que, portanto, recebe um valor constante, chamado de parâmetro (k) da parábola.

Os pontos fundamentais de uma curva de concordância vertical do tipo parabólico se apresentam na Figura 66:

- **PIV-n**: ponto de inflexão vertical (interseção das rampas);
- **PCV**: ponto de início da curva vertical (côncava ou convexa);
- **PTV**: ponto de término da curva (ou o fim da curva).

Figura 66: Desenho da curva de concordância vertical



Fonte: Autores.

A Figura 65 mostra também os elementos principais de projeto da curva, que são:

- X_1 : projeção parcial anterior (m).
- X_2 : projeção parcial posterior (m).
- L : projeção total da curva (m). Verifica-se que $L = X_1 + X_2$.
- i_{n-1} : rampa anterior (%).
- i_n : rampa posterior (%).
- e : flecha máxima – distância entre o PIV e o centro do arco de parábola (m).

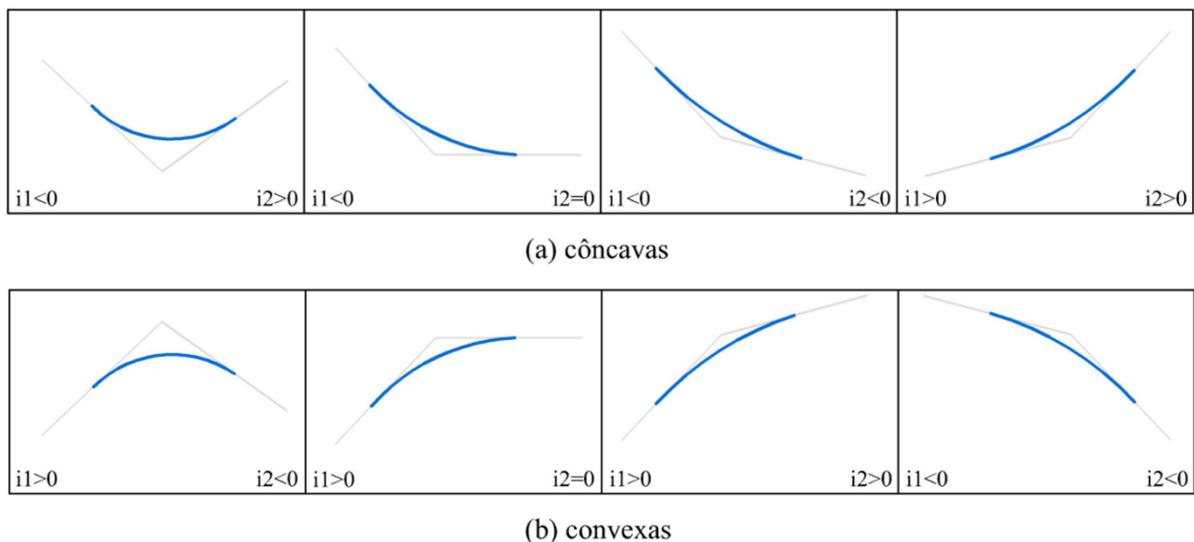
Quando os valores das projeções parciais da curva são iguais, ou seja, $X_1 = X_2 = L/2$, a curva de concordância vertical se denomina simples. Quando esses valores são diferentes, a curva é chamada de composta.

4.2.2. Cálculo das curvas de concordância vertical

O projeto de uma curva de concordância vertical do tipo parábola do 2º grau é fundamentado na definição do valor da projeção horizontal da curva L ($X1$ e $X2$ para parábola composta). Cabe destacar que todas as distâncias medidas no perfil longitudinal devem ser realizadas sempre em projeção horizontal, ou seja, como diferença entre a estaca final e inicial de cada elemento, e nunca em distância “real” diretamente no greide, pois as escalas de representação horizontal e vertical estão deformadas. Além disso, as diferenças de cota ao longo da rodovia são muito pequenas em relação à distância percorrida, de forma que a relativa imprecisão obtida por adotar como distância diretamente a projeção horizontal é desprezível.

De acordo com as inclinações das rampas concordadas pelas parábolas, as curvas podem se classificar como côncavas ou convexas, característica essencial para o projeto das mesmas. A Figura 67 apresenta as diferentes opções de curvas de concordância vertical de acordo com as rampas anterior e posterior.

Figura 67: Tipos de curvas de concordância vertical.



Fonte: Autores.

Assim, o projeto das curvas de concordância vertical passa pela definição do valor da projeção da curva. As Equações 80 e 81 permitem calcular o valor da projeção da curva:

$$L = K \times |\Delta i| \quad (80)$$

$$\Delta i = i_n - i_{n-1} \quad (81)$$

Onde:

L = projeção mínima da parábola (m).

K = parâmetro da parábola.

Δi = diferença algébrica entre inclinações das rampas (%).

i_{n-1} e i_n = inclinação das rampas anterior e posterior ao PIV (%).

Para garantir a condição de distância mínima de visibilidade de parada, descrita anteriormente (Figura 65), a norma (DNER, 1999) estabelece valores mínimos para as projeções das curvas, a partir da limitação do valor mínimo para o parâmetro da curva (Equação 82). Os valores mínimos de K são definidos na norma conforme a velocidade de projeto (diretriz) e a conformação da curva (côncava ou convexa), como mostra a Tabela 10. Além deles, a norma apresenta valores recomendados de K , que pela Equação 83 dão lugar a valores recomendados de projeção de curva, desejáveis para garantir as condições de visibilidade e segurança nas concordâncias verticais.

$$L_{min} = K_{min} \times |\Delta i| \quad (82)$$

$$L_{des} = K_{des} \times |\Delta i| \quad (83)$$

Onde:

L_{min} = projeção mínima da parábola (m)

K_{min} = parâmetro de curvatura mínimo (m).

L_{des} = projeção desejável da parábola (m).

K_{des} = parâmetro de curvatura desejável (m).

Δi = diferença algébrica entre inclinações das rampas (%).

i_{n-1} e i_n = inclinação das rampas anterior e posterior ao PIV (%).

A norma (DNER, 1999) ainda recomenda os seguintes critérios de projeto:

- O valor de L adotado deverá ser superior ao valor de L_{min} e, preferencialmente, múltiplo de 20 metros.
- Diferenças de rampa inferiores a 0,5% (em módulo) podem dispensar a curva de concordância vertical, ou seja, não é necessário projetar a curva, pois a própria execução da rodovia já permite a suavização da transição entre tais rampas consecutivas, sem necessidade de concordância geométrica.
- Atenção à drenagem para valores de K superiores ou igual a 43 nos casos onde as rampas anterior e posterior apresentarem sinais diferentes. Esse valor do parâmetro é tomado como o valor máximo nesses casos, pois geraria um comprimento de trecho muito longo em que as inclinações do greide ficariam muito próximas do valor zero (necessárias para

fazer a transição de um sinal para outro), que, portanto, podem ocasionar problemas de drenagem. Nos casos em que as rampas são do mesmo sinal, essa limitação de K_{max} não existe desde o ponto de vista da drenagem da via.

Tabela 10: Valores de K mínimos e desejáveis para projeto de curvas de concordância vertical.

Velocidade diretriz (km/h)	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
Curvas verticais convexas										
K_{min}	2	5	9	14	20	29	41	58	79	109
K_{des}	2	5	10	18	29	48	74	107	164	233
Curvas verticais côncavas										
K_{min}	4	7	11	15	19	24	29	36	43	50
K_{des}	4	7	12	17	24	32	42	52	66	80

Fonte: DNER, 1999, página 128.

4.3. PROJETO DO GREIDE

O cálculo do greide envolve a determinação das estacas e cotas dos pontos fundamentais das curvas verticais e no cálculo das cotas de todas as estacas inteiras do projeto, que geralmente são múltiplas de 20 metros, e de outros pontos de interesse.

4.3.1. Elementos das rampas

O posicionamento das rampas em perfil longitudinal é definido pelos pontos de inflexão verticais (PIVs). A posição planimétrica de um PIV é conhecida pela sua estaca e cota, definidos por escolha do engenheiro, seguindo os critérios de lançamento de rampas (Figura 68). Já a cota do ponto de partida (PPV) é um valor pré-determinado, assim como em muitas ocasiões também é da do ponto final (PFV).

Para a determinação da inclinação da rampa, é necessário o cálculo pela Equação 84, que representa a proporção entre a variação de altura e a distância entre PIVs consecutivos, sempre medida em projeção horizontal, ou seja, como diferença entre as estacas correspondentes. A inclinação geralmente é representada em valor percentual com precisão de duas casas decimais (quatro em notação decimal).

$$i_i = \frac{C_{PIVi+1} - C_{PIVi}}{km_{PIVi+1} - km_{PIVi}} \times 100 \quad (84)$$

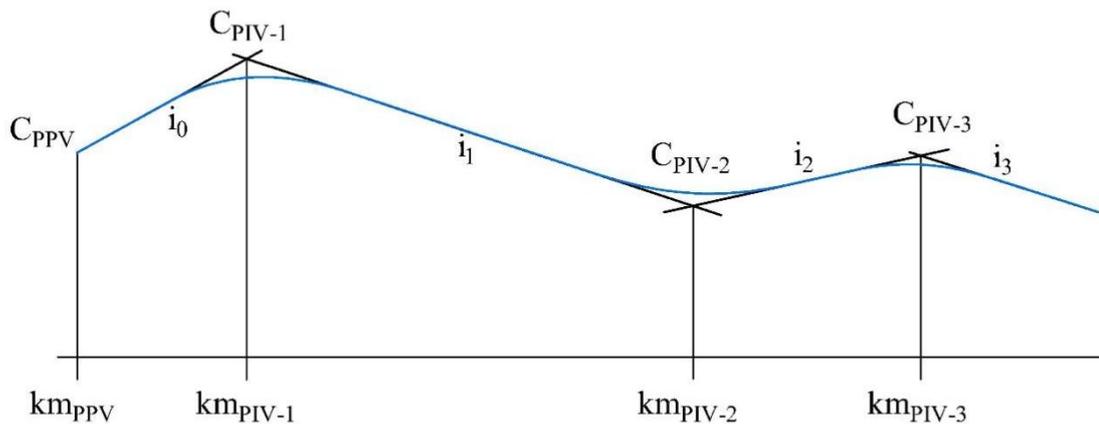
Onde:

i_i = inclinação da rampa i (%).

C_{PIVi} e C_{PIVi+1} = cotas do PIV anterior e posterior, respectivamente (m).

km_{PIVi} e km_{PIVi+1} = estacas do PIV anterior e posterior, respectivamente (m).

Figura 68: Representação do greide de um trecho rodoviário.



Fonte: Autores.

Para calcular a cota de uma estaca em rampa, é necessário utilizar como referência a estaca e a cota do PIV anterior, juntamente com a rampa que começa nele. A cota deve ser calculada com uma precisão de três casas decimais (milímetros) através da Equação 85.

$$C_{EST} = C_{PIVi} + \frac{i_i}{100} \times (km_{EST} - km_{PIVi}) \quad (85)$$

Onde:

i_i = inclinação da rampa i (%).

C_{PIVi} e C_{EST} = cotas do PIV anterior e da estaca de interesse, respectivamente (m).

km_{PIVi} e km_{EST} = estacas do PIV anterior da estaca de interesse, respectivamente (m).

4.3.2. Elementos das curvas de concordância horizontal

As principais características de uma curva de concordância horizontal são:

- A estaca e cota do PIV.
- As inclinações das rampas anterior e posterior, determinadas pela Equação 84.
- O comprimento da projeção da parábola (L ou X_1 e X_2), decidido pelo engenheiro a partir das exigências de visibilidade e drenagem, conforme a seção anterior.

Já os elementos secundários de caracterização são a flecha (e) e o parâmetro de curvatura da parábola (K). O valor da flecha para parábola simples é obtido pela Equação 86 e para parábola composta o qualquer pela Equação 87. O valor positivo da flecha é indicativo de curva de concordância vertical côncava, já o valor negativo indica uma parábola convexa.

$$e = \frac{1}{8} \times L \times \frac{(i_2 - i_1)}{100} \quad (86)$$

$$e = \frac{1}{2} \times \frac{X_1 \times X_2}{(X_1 + X_2)} \times \frac{(i_2 - i_1)}{100} \quad (87)$$

Onde:

e = flecha da parábola (m).

L = projeção da parábola simples (m).

X_1, X_2 = projeção anterior e posterior da parábola composta (m).

i_1, i_2 = inclinação da rampa anterior e posterior (%).

Os pontos de início de curva vertical (PCV) e de fim de curva vertical (PTV) são demarcados através da estaca e cota. As equações 88 e 89 determinam a posição do estaqueamento do PCV e do PTV respectivamente. Já as cotas podem ser obtidas através das equações 90 e 91.

$$km_{PCV} = km_{PIV} - X_1 \quad (88)$$

$$km_{PTV} = km_{PIV} + X_2 \quad (89)$$

$$C_{PCV} = C_{PIV} - X_1 \times \frac{i_1}{100} \quad (90)$$

$$C_{PTV} = C_{PIV} + X_2 \times \frac{i_2}{100} \quad (91)$$

Onde:

$km_{PCV}, km_{PIV}, km_{PTV}$ = estacas de PCV, PIV e PTV (m).

$C_{PCV}, C_{PIV}, C_{PTV}$ = cotas de PCV, PIV e PTV (m).

X_1, X_2 = projeção anterior e posterior da parábola composta (m).

i_1, i_2 = inclinação da rampa anterior e posterior (%).

Todas as informações calculadas para o projeto das curvas e do lançamento das rampas costumam ser incluídas em uma tabela padronizada, denominada planilha de coordenadas altimétricas, como mostra a Figura 69. A Figura inclui os passos de cálculo para preenchimento a partir dos dados de partida (estacas e cotas de cada PIV e projeções das curvas verticais).



Figura 69: Exemplo de planilha de coordenadas alométricas

Pontos Característicos				Elementos Alimétricos										
PIV	PCV		PIV		EM CURVA					EM RAMPA				
	Est. ou km	Cota (m)	Est. ou km	Cota (m)	e (m)	X1 (m)	X2 (m)	Δi (%)	k (m)	ΔPIV (m)	ΔCota (m)	Comp. (m)	i (%)	
PP			0+000,000	78,500										
1			0+160,000	90,000	60,000	60,000								
2			0+460,000	96,000	90,000	90,000								
3			0+950,000	84,000	100,000	100,000								
PF			1+180,000	714,811										
I - Dados iniciais														
Pontos Característicos				Elementos Alimétricos										
PIV	PCV		PIV		EM CURVA					EM RAMPA				
	Est. ou km	Cota (m)	Est. ou km	Cota (m)	e (m)	X1 (m)	X2 (m)	Δi (%)	k (m)	ΔPIV (m)	ΔCota (m)	Comp. (m)	i (%)	
PP			0+000,000	78,500										
1			0+160,000	90,000	60,000	60,000								
2			0+460,000	96,000	90,000	90,000								
3			0+950,000	84,000	100,000	100,000								
PF			1+180,000	714,811										
II - Etapas de cálculo														
Pontos Característicos				Elementos Alimétricos										
PIV	PCV		PIV		EM CURVA					EM RAMPA				
	Est. ou km	Cota (m)	Est. ou km	Cota (m)	e (m)	X1 (m)	X2 (m)	Δi (%)	k (m)	ΔPIV (m)	ΔCota (m)	Comp. (m)	i (%)	
PP			0+000,000	78,500										
1			0+100,000	85,688	-0,778	60,000	60,000	-	5,19	-23,13	160,000	11,500	100,000	7,19
2			0+370,000	94,2	-1,001	90,000	90,000	-	4,45	-40,46	300,000	6,000	150,000	2,00
3			0+850,000	86,449	1,699	100,000	100,000		6,80	29,43	490,000	-12,000	300,000	-2,45
PF			1+180,000	714,811							230,000	10,000	130,000	4,35
III - Calculada														

Fonte: Autores.

O processo inicia com o cálculo dos elementos das rampas (diferenças de cotas e distâncias entre PIVs, que possibilitam o cálculo da inclinação de cada uma – Equação 84). Seguidamente, a partir das diferenças de inclinações (Equação 81), se calcula a flecha das curvas de concordância vertical de cada PIV (Equações 86 e 87) e deduzir o valor do parâmetro das curvas a partir da Equação 80. Finalmente, as Equações 88 a 91 permitem calcular as estacas e cotas dos pontos de início e fim de cada curva, e a partir da diferença de estacas do PTV de uma curva ao PCV da curva seguinte se calcula o comprimento real de cada rampa.

4.3.3. Cálculo do greide

A determinação do greide envolve o cálculo da cota projetada para cada uma das estacas inteiras (múltiplas de 20 m), bem como para as estacas que correspondem aos pontos notáveis das curvas de concordância vertical (PCV e PTV). A cota do greide na estaca PIV será obtida ao somar a flecha (e) da cota do PIV. É importante levar em conta o sinal da flecha para esta operação, verificando que o resultado obtido é coerente com o caráter de curva côncava ou convexa.

Para a determinação da cota do greide dos segmentos entre o PTV da curva anterior e o PCV da nova curva, ou seja, em rampa, utiliza-se novamente a Equação 85. Interiormente à curva de concordância vertical, o greide não segue mais as rampas de forma contínua. Em vez disso, há uma diferença de altura variável conforme a estaca, resultando em variações graduais no perfil de elevação de acordo com a distância percorrida na parábola (Figura 70). A variação altimétrica pode ser determinada pela Equação 92, mantendo o sinal correspondente dado pelo sinal da flecha (positivo para curvas côncavas, negativo para curvas convexas).

$$\Delta y = e \times \frac{x_i^2}{X_i^2} \quad (92)$$

Onde:

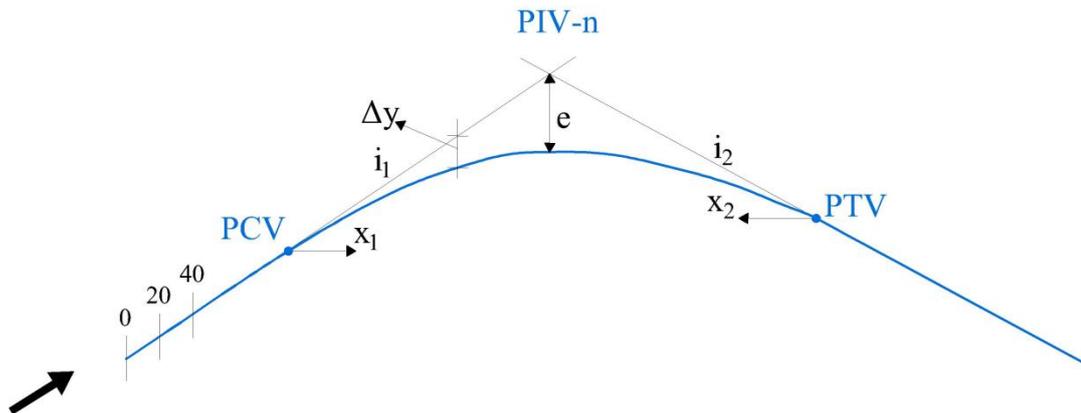
Δy = variação altimétrica (m).

e = flecha da parábola (m).

x_i = distância da estaca até o PCV ou PTV em conformidade com a posição ($i = 1$ para a projeção anterior, $i = 2$ para a projeção posterior) (m).

X_i = projeção do ramo da parábola ($i = 1$ para a projeção anterior, $i = 2$ para a projeção posterior) (m).

Figura 70: Cálculo do greide



Fonte: Autores.

A partir do cálculo da variação altimétrica devida à parábola, a cota da estaca posicionada em curva determina-se somando o valor de Δy (a partir da Equação 92) ao valor da cota que apresenta a rampa nesse ponto, aplicando a Equação 85. É importante uma vez mais prestar atenção ao sinal de Δy para obter o valor correto da cota, dependendo do tipo da curva (em curvas côncavas, a cota do greide deve ser superior à cota correspondente no mesmo ponto se estivesse em rampa, enquanto em curvas convexas a cota do greide deve ser menor).

Por outro lado, a inclinação na estaca em curva vertical também não segue o mesmo valor das rampas, pois vai mudando ao longo da parábola. A inclinação na estaca pode ser calculada mediante a Equação 93, dependendo da posição da estaca no primeiro ou no segundo ramo da parábola:

$$i = \begin{cases} i_1 + \frac{2 \cdot e \cdot x_1}{X_1^2} \cdot 100; (x_1 \leq X_1) \\ i_2 + \frac{2 \cdot e \cdot x_2}{X_2^2} \cdot 100; (|x_2| \leq X_2) \end{cases} \quad (93)$$

Onde:

i = inclinação na estaca de interesse (%).

i_1 e i_2 = inclinação das rampas anterior e posterior, respectivamente (%).

e = flecha da parábola (m).

x_1 e x_2 = distância da estaca até o PCV e da estaca ao PTV, respectivamente (m). É importante destacar que o valor de x_1 sempre será positivo, pois a estaca deve estar

depois do PCV, enquanto o valor de x_2 sempre será negativo, pois a estaca se encontra antes do PTV.

X_1, X_2 = projeção anterior e posterior da parábola (m).

4.3.4. Cotas características de projeto

Além do valor da cota calculado para todas as estacas completas do trecho e dos elementos que definem as curvas de concordância vertical (PCV, PIV e PTV), é necessário registrar as outras cotas específicas, chamadas cotas características de projeto. Essas cotas características são divididas em três grupos:

- **Cota inicial e final:** as cotas de início (PPV) e fim (PFV) do trecho caracterizam a tendência do aclave ou declive do projeto de greide como um todo.
- **Cotas máximas e mínimas locais:** podem ser produzidas pelas curvas de concordância vertical e são de suma importância para a determinação de dispositivos de drenagem (cota mínima) e do gabarito vertical da seção transversal (cota máxima).
- **Cota máxima e mínima de trecho:** são únicas e podem ser coincidentes com a maior e menor das cotas máximas e mínimas locais, respectivamente, ou ainda com as cotas inicial e final. Essa informação permite verificar a amplitude de cotas do trecho.

É importante lembrar que nem todas as curvas de concordância vertical produzem pontos de cota máxima ou mínima local, como evidenciado nas Figura 66. Para que uma curva de concordância vertical produza cotas máximas e mínimas locais, é preciso que a inclinação das rampas anterior e posterior tenham sinais opostos. Nesses casos, as curvas convexas darão lugar a pontos de cota máxima e as curvas côncavas, a pontos de cota mínima. Já quando uma das rampas estiver nivelada ($i = 0\%$) essas cotas estarão sobre todo o trecho da rampa, fora da curva de concordância vertical, e não são considerados pontos de cota máxima ou mínima local.

Para o cálculo da estaca onde se localiza o ponto de cota máxima ou mínima local dentro de uma curva de concordância vertical, faz-se uso da Equação 94:

$$x_i = \frac{-i_i \cdot X_i^2}{200 \cdot e} \quad (94)$$

Onde:

x_i = distância da estaca de cota máxima ou mínima local até o PCV ou PTV em conformidade com a posição ($i = 1$ para a projeção anterior, $i = 2$ para a projeção posterior) (m).

i_i = inclinação da rampa correspondente ao ramo da parábola ($i = 1$ para a projeção anterior, $i = 2$ para a projeção posterior) (%).

e = flecha da parábola (m).

X_i = projeção do ramo da parábola ($i = 1$ para a projeção anterior, $i = 2$ para a projeção posterior) (m).

Uma vez determinada a distância x_i pela expressão anterior, a estaca correspondente calcula-se somando esse valor à estaca do PCV ou do PTV, dependendo da posição da estaca. Igualmente, esse valor de x_i possibilita a definição da cota na estaca (que será, portanto, o valor da cota máxima ou mínima local) pela Equação 92.

4.3.5. Análise das inconformidades altimétricas

Inconformidades altimétricas referem-se a irregularidades ou problemas encontrados em relação ao projeto do perfil longitudinal de uma rodovia. Podem ser classificadas, da mesma forma que as inconformidades planimétricas, como erros ou alertas, lembrando que os erros obrigatoriamente devem ser corrigidos, enquanto os alertas devem ser corrigidos ou, caso contrário, devem ser justificados.

4.3.5.1. Erros altimétricos

Os erros altimétricos podem se manifestar de duas formas diferentes.

- **Sequência de PIVs fora de ordem:** o estaqueamento dos PIVs deve ocorrer sempre de forma crescente. Um PIV_i com estaca inferior a um PIV_{i-1} (anterior) é julgado como erro grave e deve ser corrigido. A solução é simples, exigindo apenas a numeração correta, em sequência, dos PIVs do projeto, partindo do PPV até o PFV.
- **Projeções de curvas de concordância vertical consecutivas sobrepostas:** as curvas de concordância vertical começam no PCV e devem terminar no PTV, antes do PCV da curva seguinte. É considerado um erro grave ter curvas sobrepostas (acavaladas), mesmo que seja apenas parcialmente, gerando um comprimento negativo de rampa, o que inviabiliza a materialização da rodovia em perfil. No limite, curvas de concordância verticais sucessivas poderão ter estaca de $PTV_i = PCV_{i+1}$, ou seja, tangentes entre si. Nessa situação, denomina-se este ponto de PCCV (Ponto de Concordância de Curva Vertical). A solução a esse erro altimétrico passa por diminuir os comprimentos de projeção das curvas acavaladas, mas sempre respeitando os valores mínimos derivados

da exigência de visibilidade. No caso em que os valores de projeção já estejam com valores mínimos e ainda persista esse acavamento, a única solução é o afastamento no eixo dos PIVs consecutivos até gerar um comprimento de rampa entre eles aceitável.

4.3.5.2. Alertas altimétricos

Os alertas altimétricos não devem ser considerados como erros, ou seja, não inviabilizam a construção da rodovia, mas sim como indicações de valores que estão fora da norma estabelecida ou podem gerar problemas na operação da rodovia. Cabe lembrar que sempre é recomendado o uso de valores que estejam em conformidade com a norma, a fim de garantir uma geometria adequada e segura para a rodovia e estar respaldado pela prática consolidada da técnica. Caso não seja possível atender aos valores estabelecidos, é permitido, mediante justificativa técnica, o uso de valor fora da norma, ficando então o profissional fora das diretrizes normativas e do amparo jurídico que elas oferecem. Esses alertas são divididos em seis tipos:

- **Estacas do PPV e/ou do PFV diferentes das estacas do PP e/ou PF:** normalmente, os pontos de início e término de um projeto altimétrico coincidem com o início e fim do projeto planimétrico. No entanto, em casos excepcionais, como em projetos de interseções nos extremos, esses pontos podem assumir valores diferentes.
- **Rampa máxima além da norma:** incompatibilidade do valor de rampa para a região ou classe definidos em projeto (Tabela 8). É recomendável a avaliação de opções para encaixar o valor conforme a norma e assim garantir a velocidade diretriz para o veículo de projeto da rodovia, assim como adequadas condições de nível de serviço para o tráfego, sem custos de operação excessivos.
- **Rampa mínima insatisfatória:** a rampa mínima é de suma importância para garantir a drenagem eficiente da rodovia. Em aterros altos há a possibilidade de uso de rampas com declividade igual a 0% (em nível). Em situações adversas, a implantação de dispositivos de drenagem pode solucionar o problema, mas sempre é recomendável respeitar esses valores mínimos ($\pm 0,30\%$), sobretudo nos trechos em seção em corte ou mista.
- **Ponto de cota mínima em corte:** é classificado como alerta, pois geometricamente a rodovia pode ser executada, mas gera graves problemas de drenagem por acúmulo de água sem saída natural. Por essa razão, os projetistas devem considerar este alerta como

erro de projeto, pois as soluções forçadas de drenagem nesses pontos são complexas e caras. Assim, deve ser conjurado.

- **Parâmetro K de curva de concordância vertical inferior ao mínimo:** valores de projeção das curvas de concordância vertical fora dos padrões estabelecidos pela norma (Tabela 10) indicam severos problemas de visibilidade. Classificado como alerta por não gerar um erro geométrico, também deve ser evitado em qualquer caso, para garantir as condições mínimas de segurança dos motoristas em relação à distância de parada.
- **Parâmetro K maior ou igual a 43 para curvas verticais com sinais opostos:** é obrigatório que curvas verticais com sinais opostos passem pela declividade de 0%, de forma que valores muito elevados do parâmetro K , nessa condição, geram um trecho significativamente longo com declividade aproximada de 0%, impossibilitando uma drenagem eficiente da via. Normalmente trata-se de um alerta de fácil solução, diminuindo o comprimento da projeção horizontal da curva até apresentar valores de K inferiores a esse valor máximo (estabelecidos por norma em 43).

4.3.6. Desenho altimétrico

O desenho altimétrico é representado em pranchas com o perfil longitudinal da rodovia, com escalas horizontais como 1:500, 1:1000, 1:2000 ou 1:4000, enquanto a escala vertical é ampliada em 10 vezes (1:50, 1:100, 1:200 ou 1:400) para melhor representar os desníveis do terreno natural e do projeto. As dimensões do quadro altimétrico podem variar, mas geralmente é utilizado um formato de prancha A1, com extensão de 1500 metros e altura de 40 metros nas escalas H 1:200 e V 1:200. Usualmente, é localizado na parte inferior da prancha de desenho (Figura 52).

Já em trechos do terreno com aclives ou declives acentuados, o desenho altimétrico pode exigir o transporte de coordenadas, que consiste em ajustar as referências de cota para que o perfil longitudinal possa ser observado dentro do quadro.

Os pontos PCV, PIV e PTV de cada curva de concordância vertical são destacados e marcados com estacas e cotas. Na grade de elementos altimétricos, são fornecidas informações sobre as curvas de concordância vertical (L ou X_1 e X_2 , Δi e K) e as rampas (comprimento e inclinação), além de duas linhas de cotas ao longo da marcação quilométrica, uma contendo as cotas do terreno e outra com as cotas do projeto. Elementos como sondagens, bueiros, perfis

geológicos, pontos de cota mínima e máxima, cruzamento com estradas e outras vias, ou linhas de alta tensão, também são representados, com referência ao nível do terreno e a cota do perfil neles, para assim verificar as exigências relacionadas com esses pontos de passagem. É comum utilizar uma representação linear esquemática da planimetria sobre a altimetria, uma vez que a primeira não está alinhada com a última devido às curvas presentes no terreno.

4.4. COMPRIMENTO VIRTUAL

A característica técnica vinculada ao projeto altimétrico de um trecho de rodovia é o comprimento virtual. O comprimento virtual é um comprimento fictício em linha reta e nivelada que corresponde ao mesmo trabalho mecânico realizado pelo veículo de projeto que percorre a estrada cujo traçado está sendo estudado. Seu valor pode ser determinado pela Equação 95. Ele é de suma importância, pois permite a análise e comparação entre perfis longitudinais de dois ou mais projetos viários.

$$CV = \sum CV_N + \sum CV_A + \sum CV_D \quad (95)$$

Onde:

CV = comprimento virtual da rodovia projetada (m).

CV_N = comprimento virtual de cada trecho em nível (m).

CV_A = comprimento virtual de cada trecho em aclive (m).

CV_D = comprimento virtual de cada trecho em declive (m).

Os comprimentos virtuais em nível (CV_N) e em declive (CV_D) se consideram análogos ao comprimento real (C_N e C_D), que é a distância obtida entre as estacas dos PIVs para uma determinada rampa (como sempre, em projeção horizontal). Nos trechos em aclive, o veículo precisa realizar um trabalho mecânico maior, e, portanto, seu comprimento virtual será uma função do comprimento real, acrescido de uma taxa baseada na inclinação da rampa, conforme descrito na Equação 96:

$$CV_A = C_A \times \left(1 + \frac{i}{r}\right) \quad (96)$$

Onde:

CV_A = comprimento virtual do trecho em aclive (m).

C_A = comprimento real do trecho em aclive (m).

i = declividade da rampa (m/m).

r = coeficiente de resistência ao rolamento (adimensional), adotado normalmente pelo valor 0,02.

Substituindo o valor de CV_A , dado pela Equação 96, na Equação 95, e sabendo a equivalência entre os valores dos comprimentos virtuais dos trechos em nível e em declive, obtém-se a expressão de cálculo do comprimento virtual para o trecho (Equação 97):

$$CV = C_{TOT} + \sum_i C_{Ai} \times \frac{i_i}{r} \quad (97)$$

Onde:

CV = comprimento virtual da rodovia projetada (m).

C_{TOT} = comprimento real total da rodovia projetada (m).

C_{Ai} = comprimento real do trecho i em aclive (m)

i_i = inclinação da rampa i em aclive (m/m).

r = coeficiente de resistência ao rolamento = 0,02.

Os dois sentidos do tráfego devem ser considerados no cálculo do comprimento virtual do trecho. No sentido do estacionamento (ida), os aclives passam pela correção dada pela Equação 96 e no sentido contrário ao estacionamento (volta), os declives passam a ser considerados como aclives, resultando então em dois comprimentos virtuais para o trecho viário. Em casos de trechos onde não há diferenças significativas de cotas entre PP e PF esses valores podem ser bem próximos, mas, em outros casos, adotam valores bem distintos. O comprimento virtual do trecho, será a resultante da média aritmética dos dois comprimentos virtuais calculados anteriormente, de ida e de volta, conforme a Equação 98.

$$CV_{MED} = \frac{CV_{IDA} + CV_{VOLTA}}{2} \quad (98)$$

Onde:

CV_{MED} = comprimento virtual médio da rodovia projetada (m).

CV_{IDA} = comprimento virtual no sentido do estacionamento (m).

CV_{VOLTA} = comprimento virtual no sentido contrário ao estacionamento (m).

4.5. EXERCÍCIOS

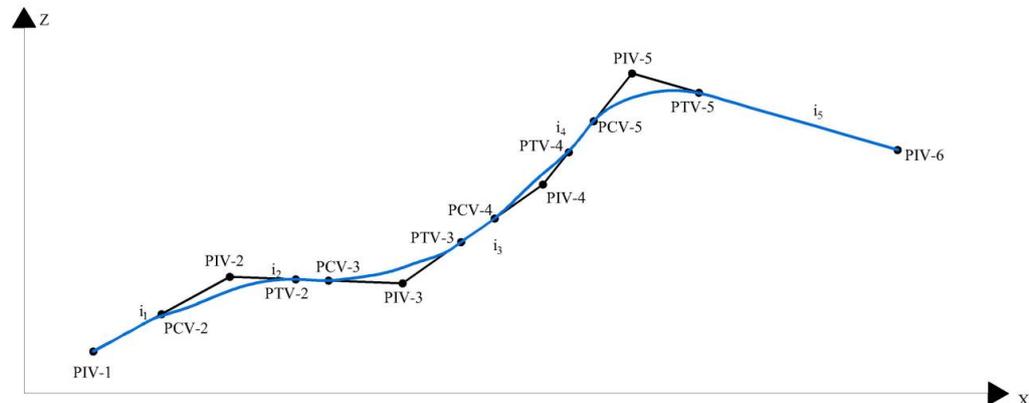
I. Uma rodovia Classe I em região ondulada está sendo projetada. A rodovia apresenta rampas com as seguintes inclinações: $i_1=3,00\%$, $i_2=0,00\%$, $i_3=5,70\%$, $i_4=6,00\%$ e $i_5=-2,00\%$.

Pede-se:

- Um croqui do greide da rodovia.
- Δi .
- O tipo de curva (côncava ou convexa).
- $L_{mín}$.
- L_{des} .
- $L_{máx}$.

Resposta:

A)



B) e C) $\Delta i_{1-2} = -3,00\%$; Curva convexa

$\Delta i_{2-3} = 5,70\%$; Curva côncava

$\Delta i_{3-4} = 0,30\%$; Curva côncava

$\Delta i_{4-5} = -8,00\%$; Curva convexa

D) $L_{mín1-2} = 87,000 = 100,000\text{m}$

$L_{mín2-3} = 136,800 = 140,000\text{m}$

$L_{mín3-4} = 7,200 = 0,000\text{m}$ (por $\Delta i_{3-4} = 0,30\% < 0,50\%$, pode-se dispensar a curva de concordância vertical)

$L_{mín4-5} = 232,000 = 240,000\text{m}$

E) $L_{des1-2} = 144,000 = 160,000\text{m}$

$L_{des2-3} = 182,400 = 200,000\text{m}$

$L_{des3-4} = 9,600 = 20,000\text{m}$

$L_{des4-5} = 384,000 = 400,000\text{m}$

F) $L_{máx1-2} = L_{máx2-3} = L_{máx3-4} = \infty$ (não existe restrição para valor máximo de projeção)

$L_{máx4-5} = 344,000 = 340,000\text{m}$ (possui rampa anterior e posterior com sinais diferentes).



II. O projeto de uma curva vertical do tipo parábola simples concorda $i_7=2,5\%$ com $i_8=0,6\%$. Conhecendo-se: PCV (km 11+230,000; e cota 11,110m) e $L=140,000\text{m}$. Pede-se: Cota do greide na Est km 11+280,000.

Resposta:

Cota = 12,190 m

III. Projetou-se uma curva vertical do tipo parábola composta com $L=220,00\text{m}$. Sabendo que: $X_2=80,000\text{m}$, $i_1=2,7\%$, $i_2=-1,9\%$, Est. PCV=km 18+210,000 e cota PCV=15,100m. Pede-se o valor da cota do greide nas Est. 18+260,000 e 18+380,000.

Resposta:

Cota 18+260,000 = 16,301 m

Cota 18+380,000 = 17,853 m.

IV. Com base na planilha parcial da Figura 71, extraído do relatório de altimetria de um trecho rodoviário classe II em região montanhosa:

Figura 71: Exercício de altimetria

PI	PONTOS CARACTERÍSTICOS			
	PIV		Em curva	
	Est. ou km	Cota (m)	X1 (m)	X2 (m)
PP	0+000,000	713,079		
1	0+241,633	698,822	30,000	30,000
2	0+731,006	691,498	30,000	30,000
3	1+209,276	668,022	60,000	60,000
4	1+794,126	691,272	60,000	60,000
5	2+284,848	668,754	10,000	10,000
6	2+521,709	659,700	20,000	20,000
7	2+768,050	656,337	30,000	30,000
8	3+140,117	668,041	10,000	10,000
9	3+618,160	682,423	30,000	30,000
10	3+985,447	706,068	10,000	10,000
11	4+395,394	731,451	20,000	20,000
PF	4+613,275	739,361		

Fonte: Autores.

- A) Determinar se a curva vertical do PIV-3 é côncava ou convexa.
- B) Determinar se a curva vertical do PIV-6 é côncava ou convexa.
- C) Para o PIV-4, determine a projeção mínima desejável.
- D) Para o PIV-5, determine a projeção mínima necessária.
- E) Determine a cota da estaca 0+440.
- F) Determine a cota da estaca 2+560.

- G) Determine a inclinação no greide da estaca 0+440.
 H) Determine a inclinação no greide da estaca 2+560.
 I) Determine a cota mínima ou máxima do PIV-4.
 J) Determine a cota mínima ou máxima do PIV-7.

Resposta:

- A) Côncava.
 B) Côncava.
 C) 102,769m (120,0m).
 D) 8,426m (20m).
 E) 695,8536m.
 F) 659,1770m.
 G) -1,5%.
 H) 1,37%.
 I) 691,1416m (máxima).
 J) 656,3172 m (mínima).

V. Com base no relatório de coordenadas altimétricas de um trecho rodoviário classe III em região ondulada apresentada na Figura 72:

Figura 72: Exercício sobre planilha de coordenada altimétricas.

PIV	PONTOS CARACTERISTICOS					
	PCV		PIV		PTV	
	est ou Km	Cota(m)	est ou Km	Cota (m)	est ou Km	Cota (m)
PP			0+000,000	80,000		
1			0+141,000	70,000		
2			0+345,000	85,000		
3			0+715,000	62,000		
4			1+620,000	55,000		
5			2+215,000	70,000		
6			2+790,000	58,000		
7			3+835,000	90,000		
PF			4+105,060	100,000		

PIV	ELEMENTOS ALTIMETRICOS								
	EM CURVA					EM RAMPA			
	e (m)	X1(m)	X2(m)	$\Delta i(\%)$	k(m)	ΔPIV (m)	$\Delta Cota$ (m)	Comp. (m)	i(%)
PP									
1		80,000	80,000						
2		110,000	100,000						
3		110,000	110,000						
4		100,000	100,000						
5		100,000	90,000						
6		120,000	120,000						
7		100,000	100,000						
PF									

Fonte: Autores.

- A) Preencha a tabela, e indique se as curvas de concordância vertical são côncavas ou convexas, e justifique.
 B) Calcule o comprimento virtual da ida.



- C) Calcule o comprimento virtual da volta.
D) Calcule o comprimento virtual médio.
E) Calcule o esforço altimétrico adicional percentual do trecho.
F) Calcule o porcentagem de declives anômalas do trecho, e comente.

Resposta:

A)

PIV	PONTOS CARACTERISTICOS					
	PCV		PIV		PTV	
	est ou Km	Cota(m)	est ou Km	Cota (m)	est ou Km	Cota (m)
PP			0+000,000	80,000		
1	0+061,000	75,674	0+141,000	70,000	0+221,000	75,882
2	0+235,000	76,912	0+345,000	85,000	0+445,000	78,784
3	0+605,000	68,838	0+715,000	62,000	0+825,000	61,149
4	1+520,000	55,773	1+620,000	55,000	1+720,000	57,521
5	2+115,000	67,479	2+215,000	70,000	2+305,000	68,122
6	2+670,000	60,504	2+790,000	58,000	2+910,000	61,675
7	3+735,000	86,938	3+835,000	90,000	3+935,000	93,703
PF			4+105,060	100,000		

PIV	ELEMENTOS ALTIMETRICOS									TIPO
	EM CURVA					EM RAMPA				
	e (m)	X1(m)	X2(m)	$\Delta i(\%)$	k(m)	ΔPIV (m)	$\Delta Cota$ (m)	Comp. (m)	i(%)	
PP						0,000				
1	2,889	80,000	80,000	14,45	11,08	141,000	-10,000	61,000	-7,09	côncava
2	-3,554	110,000	100,000	-13,57	-15,48	204,000	15,000	14,000	7,35	convexa
3	1,497	110,000	110,000	5,44	40,44	370,000	-23,000	160,000	-6,22	côncava
4	0,824	100,000	100,000	3,29	60,79	905,000	-7,000	695,000	-0,77	côncava
5	-1,091	100,000	90,000	-4,61	-41,22	595,000	15,000	395,000	2,52	convexa
6	1,545	120,000	120,000	5,15	46,60	575,000	-12,000	365,000	-2,09	côncava
7	0,160	100,000	100,000	0,64	312,50	1045,000	32,000	825,000	3,06	côncava
PF						270,060	10,000	170,060	3,70	

B) 7.702,921m.

C) 6.704,905m.

D) 7.203,913m.

E) 75,49%.

F) 17,42%.

5. SUPERELEVAÇÃO E SUPERLARGURA

O projeto geométrico do eixo de uma rodovia é formado por trechos em tangente e em curva, que apresentam características técnicas e condições de operação obviamente distintas. Quando um usuário percorre um trecho em tangente, ele experimenta uma maior facilidade para realizar pequenas manobras de ajuste lateral em seu percurso, sem ser acometido por esforços laterais decorrentes da geometria da rodovia. Porém, ao percorrer um trecho em curva, as condições operacionais se alteram significativamente. O surgimento de esforços laterais sobre o veículo, devidos à força centrífuga, juntamente com a sensação de maior confinamento ao percorrer uma curva, podem afetar a disposição do usuário em manter a mesma velocidade de operação nos trechos retilíneos e nos trechos em curva.

Esses fatores, em conjunto, destacam a importância da superelevação e da superlargura no projeto geométrico de rodovias, visando a segurança e o conforto dos motoristas, assim como a fluidez do tráfego. A superelevação proporciona estabilidade, reduzindo riscos de derrapagens e capotamentos, enquanto a superlargura oferece espaço adicional para manobras e melhor capacidade de ultrapassagem, sobretudo em relação aos veículos longos, minimizando colisões laterais e promovendo um tráfego mais eficiente.

5.1. SUPERELEVAÇÃO

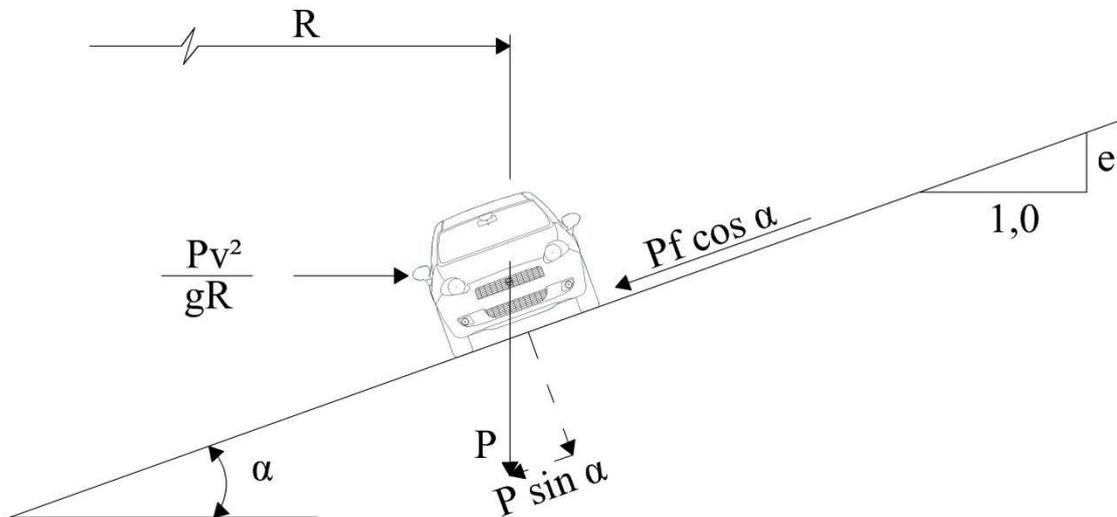
A superelevação é um elemento do projeto geométrico que consiste na inclinação da seção transversal das faixas de rolamento em relação ao eixo da rodovia, criando uma diferença de altura entre a parte interna e externa da curva, que geralmente é expressa em porcentagem (%) ou proporção (m/m). Essa inclinação é projetada de forma a compensar a força centrífuga que atua sobre os veículos durante as curvas, proporcionando estabilidade e segurança.

5.1.1. Necessidade

Como dito anteriormente, ao entrar em um trecho curvilíneo, os veículos sofrem com a atuação da força centrífuga, que age de dentro para fora da curva dificultando a realização do percurso e tentando “fazer sair da curva” ao veículo. Esta força é diretamente proporcional ao quadrado da velocidade e inversamente proporcional ao raio da curva. Na Figura 73 apresentam-se as forças atuantes sobre um veículo em movimento, descrevendo uma trajetória

circular, e é possível observar que para contrabalançar os efeitos da força centrífuga, utiliza-se a superelevação da pista de rolamento, definida como a tangente do ângulo de inclinação transversal da pista (α).

Figura 73: Forças atuantes sobre veículos em trajetórias curvilíneas.



Fonte: DNER, 1999, página 72.

5.1.2. Abaulamento

Nos trechos em tangente de uma rodovia, a pista é dotada de abaulamento. O abaulamento (denotado como i) é um termo utilizado para descrever a inclinação transversal da pista nos trechos em tangente, pela qual os bordos da plataforma de terraplenagem são rebaixados em relação ao eixo central, com o objetivo de facilitar o escoamento da água proveniente de chuvas sobre a pista, evitando acúmulo na superfície e assim, reduzindo o risco de aquaplanagem e perda de aderência dos pneus dos veículos.

A Norma (DNER, 1999) estabelece os seguintes valores para o abaulamento, nos projetos de rodovias com pavimentos convencionais:

- Revestimentos betuminosos com granulometria aberta: 2,50% a 3,00%.
- Revestimentos betuminosos de alta qualidade: 2,00%.
- Pavimento de concreto de cimento: 1,50%.

5.1.3. Casos de dispensa de superelevação

A superelevação pode ser dispensada para casos onde a curva possui raios muito grandes em relação à velocidade diretriz do projeto, já que o efeito da força centrífuga nessa situação é muito pequeno, como observado na Figura 73. Nesses casos, podem-se projetar as seções transversais da pista em curva para as condições de trecho em tangente, isto é, apenas com abaulamento.

A Norma (DNER, 1999) estabelece os valores de raio de curva acima dos quais pode-se considerar as curvas como se fossem tangentes, de acordo com a velocidade diretriz do projeto e, portanto, é dispensado o uso de superelevação. Esses valores estão indicados na Tabela 11.

Tabela 11: Valores mínimos de raio para dispensa da superelevação de acordo com a velocidade diretriz.

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

Fonte: DNER, 1999, página 97.

5.1.4. Valores mínimos, máximos e adotados de superelevação

Para curvas com raio abaixo dos valores apresentados nas Tabela 11, considera-se necessária a adoção de superelevação. A superelevação mínima nesses casos, mesmo quando a força centrífuga atuante não demande, equivale em módulo ao valor do abaulamento nos trechos retilíneos da rodovia.

Já o valor máximo admissível de superelevação (e_{max}) a ser adotado para as concordâncias horizontais com raios pequenos, é estabelecido em função de outros critérios, fundamentalmente de acordo com a classe da rodovia e seu uso, como se apresenta na Tabela 12. Vale a pena destacar que, segundo se mostra na Tabela, os valores máximos normais em projetos de novas rodovias ficam em 8 e 10%.

A relação existente entre os valores de superelevação máxima e os raios mínimos de curva pode ser conferida através da Tabela 4, de acordo com a velocidade diretriz, com valores dependentes das características do relevo da região e da classe da rodovia.



Tabela 12: Valores máximos de superelevação em curvas de concordância horizontal.

e_{max}	Casos de emprego
12%	Máximo absoluto em circunstâncias específicas.
10%	Máximo normal, Adequado para fluxo ininterrupto. Adotar para rodovias Classe o e Classe I em regiões planas e onduladas.
8%	Valor superior normal. Adotar para rodovias Classe I em regiões montanhosas e rodovias das demais classes de projeto.
6%	Valor inferior normal. Adotar para projetos em áreas urbanizadas ou em situações em que o tráfego está sujeito a reduções de velocidade ou paradas.
4%	Mínimo. Adotar em situações extremas, com intensa ocupação do solo adjacente.

Fonte: Adaptado de DNER, 1999, página 98.

Por sua vez, a superelevação das curvas que apresentam raios intermediários, entre os valores de raios mínimos (Tabela 4) e raios que dispensam seu uso (Tabela 11), se dá em função do valor da superelevação máxima e do raio de curva, conforme a Equação 99:

$$e = e_{max} \times \left(\frac{2R_{min}}{R} - \frac{R_{min}^2}{R^2} \right) \quad (99)$$

Onde:

e = valor de superelevação a ser adotado (%).

e_{max} = valor de superelevação máxima (%) (Tabela 12).

R = raio da curva (m).

R_{min} = raio mínimo da curva para a superelevação máxima para a velocidade diretriz (m) (Tabela 4).

5.2. SUPERLARGURA

A superlargura refere-se à largura acrescida na pista em trechos de curva com o objetivo de melhorar as condições de conforto e segurança durante a manobra, principalmente para veículos de grande porte, como os caminhões e ônibus.

Quando um veículo comercial está em uma curva, sua trajetória tende a se estender para fora da curva, devido às forças laterais resultantes da mudança de direção e da superelevação e pelas próprias dimensões do veículo rígido, que ocupam espaços laterais maiores que suas próprias larguras. Assim, nesses casos, o veículo rígido não pode acompanhar adequadamente

a curvatura da estrada e a sensação de confinamento pelos efeitos de deformação visual da pista em curva em perspectiva pode levar ao motorista a querer se afastar do bordo externo da curva, invadindo então parcialmente a faixa contrária, ou, para manter a distância mínima entre veículos que existia no trecho em tangente, diminuir sua velocidade, o que pode prejudicar a operação e condições de nível de serviço da rodovia. A superlargura, portanto, é projetada para aumentar a largura da pista e acomodar esse deslocamento lateral do veículo mediante um espaço adicional na seção transversal da estrada, que proporciona maior liberdade de manobra e condições de segurança.

É importante ressaltar também que, devido à necessidade derivada do projeto dos trechos em curva, a superlargura e a superelevação são usadas juntas, uma complementando a outra, e devem ser consideradas sempre no projeto da seção transversal nas curvas.

5.2.1. Valor mínimo e casos de dispensa de superlargura

A aplicação da superlargura nas faixas de uma rodovia está relacionada ao raio das curvas presentes no trecho e à largura básica da pista em tangente (L_b). Assim, em curvas com raios amplos, é possível que a adoção de superlargura não seja necessária, dependendo desses dados e da velocidade e do veículo de projeto, pois mesmo os veículos mais longos conseguem realizar a manobra com segurança. As Tabelas 13 e 14 apresentam os valores dos raios acima dos quais é dispensável a superlargura.

Tabela 13: Valores mínimos de raio para dispensa da superlargura em trechos em curva com largura básica da pista em tangente = 7,20 m.

V (km/h)	30	40	50	60	70	80	90	100
R (m) – Veículo CO	130	160	190	220	260	310	360	420
R (m) – Veículo SR	270	300	340	380	430	480	540	600

Fonte: DNER, 1999.

Tabela 14: Valores mínimos de raio para dispensa da superlargura em trechos em curva com largura básica da pista em tangente = 6,60 m.

V (km/h)	30	40	50	60	70	80
R (m) – Veículo CO	340	430	550	680	840	1000

Fonte: DNER, 1999.

5.2.2. Cálculo de superlargura

A superlargura é calculada sempre em consideração ao veículo de projeto. Assim, o veículo base para a determinação da superlargura a ser adotada é normalmente o veículo do tipo CO, sendo que os demais veículos irão operar de forma satisfatória com os resultados obtidos.

A Norma (DNER, 1999) estabelece que para a determinação da superlargura devem seguir-se alguns critérios:

- O veículo percorre o trecho circular mantendo seu eixo traseiro 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 análogo ao raio da concordância horizontal.

Já o cálculo da superlargura é feito por meio da Equação 100, que considera o número de faixas de tráfego e o raio da curvatura para uma dada velocidade de projeto.

$$S = n \left(R - \sqrt{R^2 - E^2} \right) + \frac{V}{10\sqrt{R}} \quad (100)$$

Onde:

S = superlargura (m).

n = número de faixas de tráfego (normalmente, 2 para rodovias de pista simples).

R = raio da curva (m).

E = distância entre os eixos da parte rígida do veículo (normalmente, 6,10 m para CO como veículo de projeto).

V = velocidade de projeto (km/h).

Os valores adotados de superlargura devem ser sempre arredondados a múltiplos de 0,20 m (para cima), respeitando o valor mínimo de 0,40 m (nos casos em que seja necessário).

Nos projetos rodoviários em que a presença de veículos articulados seja importante e, portanto, seja adotado como veículo de projeto, a equação anterior é adaptada para considerar as diferentes distâncias entre eixos desses veículos, substituindo o valor de E por uma distância equivalente E_{eq} , mediante a Equação 101:

$$E_{eq} = \sqrt{E_1^2 + E_2^2} \quad (101)$$

Onde:

E_{eq} = distância entre eixos equivalente, para os veículos articulados (m).

E_1 = distância entre o eixo dianteiro do veículo trator e o pivô de apoio do semi-reboque (normalmente, 4,20 m).

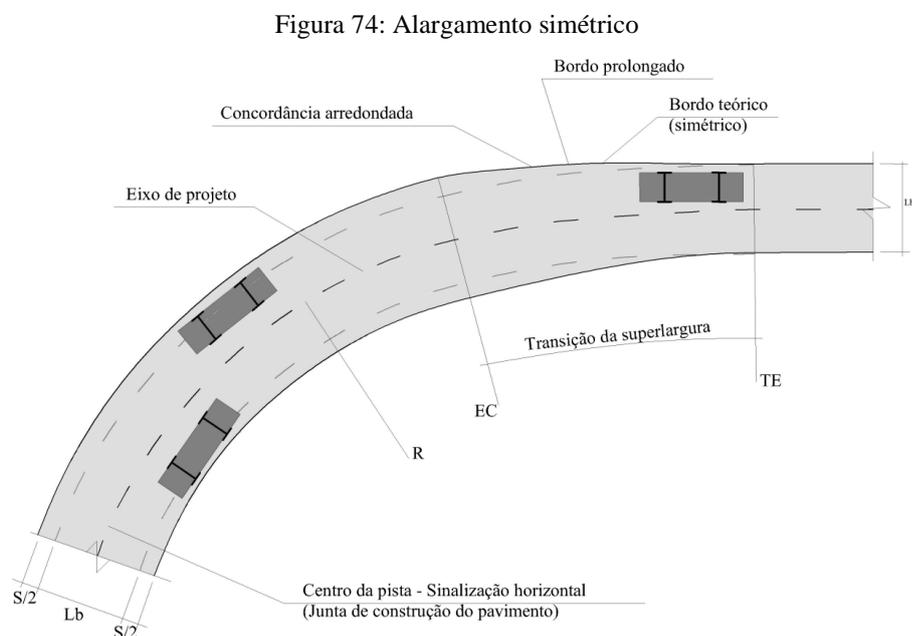
E_2 = distância desse pivô ao eixo traseiro ou ao ponto médio dos eixos traseiros do semi-reboque (normalmente, 7,00 m).

Para pistas de mais de 2 faixas, o valor da superlargura é obtido a partir dos valores básicos calculados pelas expressões anteriores e multiplicados por fatores: por 1,25 e para pistas com 3 faixas; por 1,50, para pistas com 4 faixas. Todos os valores de superlargura para pistas de 2, 3 e 4 faixas aparecem tabelados no Manual do DNER (1999), páginas 77 a 82.

5.2.3. Implantação da superlargura

A superlargura pode ser disposta de duas formas:

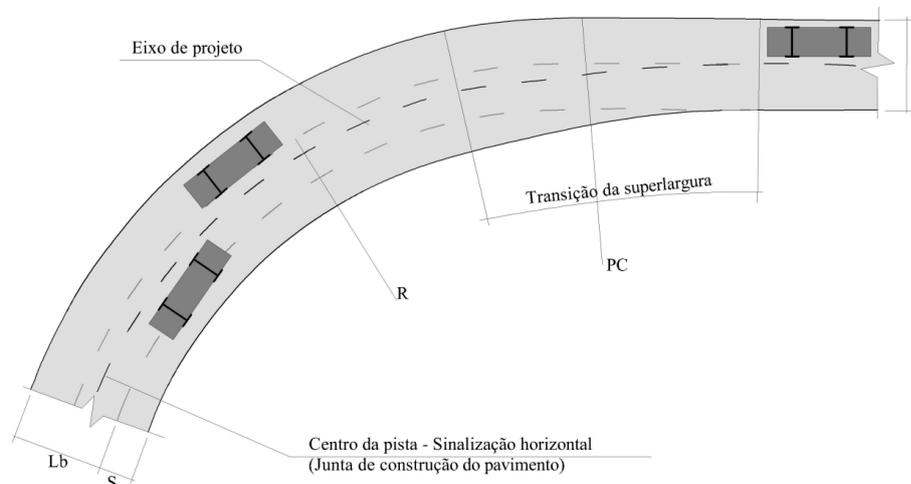
- **alargamento simétrico:** metade para cada lado da pista. No caso mais comum de duas faixas, a metade do valor calculado é somado externamente à cada faixa, mantendo a posição do eixo. É a forma normalmente recomendada, sobretudo para curvas compostas. Nos casos de rodovias de pista dupla com canteiro central, cuja largura deve ser mantida constante, o alargamento também é realizado para o lado externo de todas as faixas (Figura 74).



Fonte: DNER, 1999, página 84.

- **alargamento assimétrico:** integralmente de um único lado da pista, normalmente o interno. A linha central da rodovia resultará deslocada para o lado de dentro da curva, gerando linha central mais fluente para os usuários, porém alterando o projeto planimétrico do trecho (Figura 75). É mais comum em curvas simples.

Figura 75: Alargamento assimétrico



Fonte: DNER, 1999, página 85.

5.3. DISTRIBUIÇÃO DA SUPERELEVAÇÃO E DA SUPERLARGURA

Nesta seção é apresentado como ocorre a distribuição da superelevação e da superlargura ao longo da curva horizontal, seja ela simples ou composta, pois é necessário realizar uma transição suave dos valores em tangente da inclinação transversal da pista (abaulamento para cada lado da pista) e da largura da plataforma de terraplenagem (largura básica, sem superlargura), para os valores em curva (com os valores de superelevação e superlargura calculados).

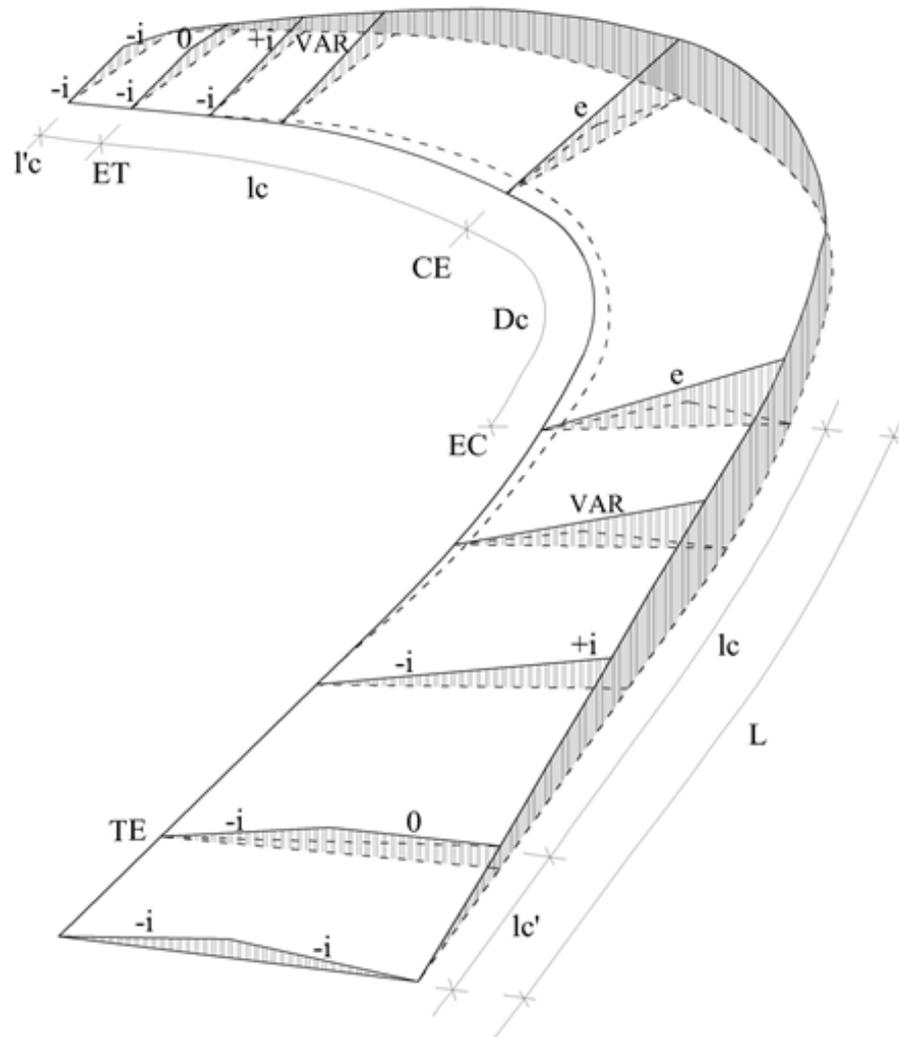
A distribuição da superelevação viabiliza o cálculo da cota do bordo externo nas estacas inteiras, ao longo do comprimento de distribuição, denominado L , enquanto a distribuição da superlargura viabiliza o cálculo da largura da seção transversal e influencia igualmente no cálculo das cotas dos bordos da plataforma e posição dos offsets.

5.3.1. Distribuição na curva circular composta

No caso mais comum de curva composta com transição, a implantação da superelevação é realizada na curva de transição, mas uma parte (correspondente à eliminação do abaulamento

i) deve ser realizado antes de entrar na curva (Figura 76). Nesse caso, surge a necessidade de uma distância antes e depois do início e fim da curva, respectivamente, denominada l_c' .

Figura 76: Distribuição da superelevação na curva circular composta



Fonte: DNER,1999.

A extensão da eliminação do abaulamento antes do início da curva (que será igual à extensão para reimplantação do abaulamento após a saída da curva) se calcula a partir de uma relação linear indicada na Equação 102. A partir dela, a extensão do trecho de distribuição da superelevação se calcula somando-a ao comprimento da clotóide (Equação 103).

$$l_c' = \frac{l_c \times i}{e} \quad (102)$$

$$L = l_c + l_c' \quad (103)$$

Onde:

l_c' = extensão de eliminação do abaulamento (m).

l_c = desenvolvimento da curva de transição (m).

i = inclinação transversal em tangente (abaulamento) (%).

e = superelevação adotada na curva (m).

L = extensão do trecho de distribuição da superelevação (m).

Para a distribuição da superlargura, em curvas compostas ela é realizada apenas dentro das transições, passando do valor zero no ponto de início da curva (TE) até o valor máximo no final da clotóide (EC), de forma linear (Figura 76).

5.3.2. Distribuição na curva circular simples

No caso de curva de concordância circular simples, não existe transição para implantação da superelevação, portanto a distribuição da superelevação é realizada parte antes e parte depois do início da curva (Figura 77). O processo de cálculo é similar ao caso anterior, mas utilizando um comprimento de clotóide “virtual”, denotado como C , a partir do qual se calcula a extensão correspondente à eliminação do abaulamento.

O valor de C é informado na Norma (DNER, 1999) em função da velocidade diretriz da rodovia (Tabela 15). A partir dele, o cálculo da extensão da distribuição da superelevação se realiza a partir das Equações 104 e 105:

$$l' = \frac{C \times i}{e} \quad (104)$$

$$L = l' + C \quad (105)$$

Onde:

l' = extensão de eliminação do abaulamento (m).

C = extensão de implantação da superelevação (m) (Tabela 15).

i = inclinação transversal em tangente (abaulamento) (%).

e = superelevação adotada na curva (m).

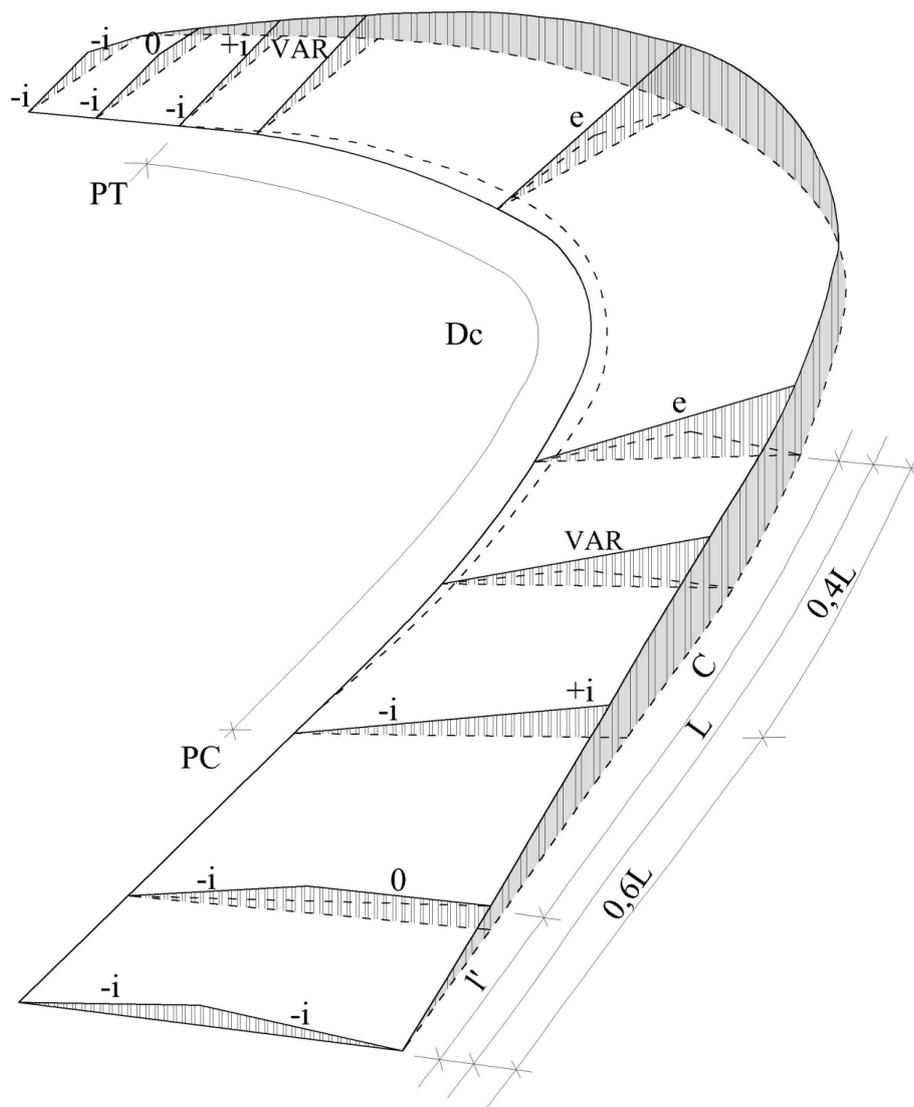
L = extensão do trecho de distribuição da superelevação (m).

Tabela 155: Valores de C para distribuição da superelevação e superlargura em curvas de concordância horizontal circular simples.

V (km/h)	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
C (m)	20	30	30	30	40	40	50	60	60	70

Fonte: DNER, 1999, página 107.

Figura 77: Distribuição na curva circular simples



Fonte: DNER, 1999.

Nas curvas simples, a distribuição da superelevação e de superlargura coincidem em toda a extensão dela. Normalmente, se adota 60% do comprimento de transição para fora da curva e o 40% restante dentro da curva, a partir do PC (Figura 77). Dessa forma, é possível realizar uma distribuição gradual da mudança de inclinação transversal da pista.

5.4. EXERCÍCIOS

I. Calcular e distribuir a superelevação e a superlargura na curva composta com transição de acordo com os dados seguintes. Utilizar distribuição da superlargura em metade para cada faixa.



Trata-se de uma rodovia de Classe II em região ondulada, com pavimento betuminoso de alta qualidade e veículo de projeto CO.

$$R = 215,000 \text{ m.}$$

$$PP = \text{EST } 0+00,000 \text{ m.}$$

$$TEE = \text{EST } 3+02,790 \text{ m.}$$

$$EC = \text{EST } 5+12,790 \text{ m.}$$

$$CE = \text{EST } 7+13,590 \text{ m.}$$

$$ET = \text{EST } 10+03,590 \text{ m.}$$

$$PF = \text{EST } 12+13,950 \text{ m.}$$

Resposta: $e = 7,6\%$; $S = 0,80 \text{ m.}$

Estaca	Faixa esquerda		Faixa direita	
	Superelev. (%)	Superlarg. (m)	Superelev. (%)	Superlarg. (m)
PP = 0+00,000	-2,00	0,000	-2,000	0,000
1	-2,00	0,000	-2,000	0,000
2	-2,00	0,000	-2,000	0,000
Início transição = 2 + 09,803m	-2,00	0,000	-2,000	0,000
3	-2,00	0,000	-0,430	0,000
TEE=3 + 02,790m	-2,00	0,000	0,000	0,000
4	-2,62	0,138	2,620	0,138
5	-5,66	0,298	5,660	0,298
EC = 5 + 12,790m	-7,60	0,400	7,600	0,400
6	-7,60	0,400	7,600	0,400
7	-7,60	0,400	7,600	0,400
CE = 7 + 13,590m	-7,60	0,400	7,600	0,400
8	-6,63	0,349	6,630	0,349
9	-3,59	0,189	3,590	0,189
10	-2,00	0,029	0,550	0,029
ET = 10+03,590m	-2,00	0,000	0,000	0,000
ransição = 10 + 16,2	-2,00	0,000	-2,000	0,000
11	-2,00	0,000	-2,000	0,000
12	-2,00	0,000	-2,000	0,000
PF=12 + 13,950m	-2,00	0,000	-2,000	0,000

II. Preencha as lacunas abaixo com: (*e*) se for necessário superelevação ou (*i*) se for necessário apenas abaulamento.

A) () Curva circular simples, de raio = 900,000 m em uma rodovia de classe III em região montanhosa.

B) () Trecho reto em rodovia de classe I, relevo ondulado.

C) () Curva composta com transição, de raio = 180,000 em uma rodovia de classe II em região ondulada.

Resposta: A) *i*; B) *i*; C) *e*.

III. Preencha as lacunas abaixo com: (S) se for necessário superlargura ou (N) se não for necessário superlargura.

A) () Curva composta com transição de raio = 200,000 m em rodovia de velocidade diretriz = 50 km/h e largura da pista em tangente de 6,600 m, com veículo de projeto CO.

B) () Trecho em tangente com largura da pista de 7,200 m, veículo de projeto CO e velocidade diretriz = 60 km/h.

C) () Curva circular simples de raio = 215,000 m em rodovia de velocidade diretriz = 40 km/h e largura da faixa em tangente de 3,600 m, com veículo de projeto SR.

Resposta: A) S; B) N; C) S.

IV. Com base no relatório de coordenadas da Figura 78, de um trecho rodoviário classe IV-A em região ondulada, com revestimento de concreto de cimento, faixas de 3,30 m de largura, distribuição simétrica da superlargura e veículo de projeto CO.

Figura 78: Exercício de superlargura e superelevação.

PI	ESTAQUEAMENTO (Est. ou km)				PARÂMETROS DA CURVA								
	PC ou TE	EC	CE	PT ou ET	AC (°'")		R (m)	Lc1 (m)	Lc2 (m)	De (m)	T1 (m)	T2 (m)	
PP				0+000,000									
1	0+380,028			0+568,833	36°03'32,45"	D	???			188,805	97,647	97,647	
2	???	???	1+407,262	1+467,262	49°44'18,14"	E	210	60	60	122,301	???	???	
3	1+978,407	2+058,407	2+189,291	2+269,291	80°33'07,14"	D	150	???	???	130,885	168,509	168,509	
4	???	2+655,240	2+842,948	???	???	?	190	40	40	???	150,004	150,004	
5	3+211,536	3+291,536	3+478,587	3+558,587	95°37'49,80"	D	160	???	???	187,051	218,302	218,302	
6	4+099,652	4+179,652	4+323,871	4+403,871	64°14'02,98"	E	???	80	80	144,220	166,325	166,325	
7	4+527,591	4+567,591	4+657,063	4+697,063	30°54'33,64"	D	240	40	40	???	???	???	
8	???			5+612,739	49°15'50,51"	D	???			266,544	142,139	142,139	
9	5+961,497	5+981,497	???	???	75°39'59,80"	E	220	20	20	270,539	180,913	180,913	
PF	6+698,465												

PI	ALINHAMENTO			COORDENADAS	
	Az (°'")	IntTan (m)	ΔPI (m)	X (m)	Y (m)
PP	323°45'43,22"	380,028	477,675	276633,0972	6863397,167
1	359°49'15,67"	656,129	???	276350,7241	6863782,445
2	310°04'57,52"	511,145	807,306	276347,9707	6864663,868
3	???	345,949	664,462	275730,2876	6865183,686
4	321°58'04,36"	328,588	696,893	276068,8717	6865755,411
5	57°35'54,15"	???	925,692	275639,5136	6866304,33
6	353°21'51,17"	???	376,47	276421,087	6866800,363
7	24°16'24,81"	649,132	877,696	276377,583	6867174,311
8	73°32'15,33"	348,758	671,809	276738,3984	6867974,413
9	???	???	607,341	277382,6673	6868164,794
PF				277360,1047	6868771,716

Fonte: Autores.

- Para a curva do PI-3, determine a superelevação adotada.
- Para a curva do PI-3, determine a superlargura necessária.
- Para a curva do PI-8, determine a superelevação adotada.
- Para a curva do PI-8, determine a superlargura necessária.
- Para a curva do PI-2, determine o ponto de início da eliminação do abaulamento.
- Para a curva do PI-1, determine a taxa de distribuição da superelevação.
- Determine a inclinação da plataforma na faixa direita na estaca 2+620.



- H) Determine a largura total da faixa esquerda na estaca 2+620.
I) Para a curva do PI-1, determine a estaca de fim da implantação da superelevação.
J) Determine a inclinação no bordo da faixa esquerda na estaca 5+340.

Resposta:

- A) 7,8%
- B) 0,80 m
- C) 5,2%
- D) 0,60 m
- E) 1+211,528
- F) 0,177 %/m
- G) 1,02%
- H) 3,310 m
- I) 0+395,424
- J) 2,31%.

6. SEÇÕES TRANSVERSAIS

A seção transversal de uma rodovia é uma representação gráfica da estrada em corte vertical e perpendicular ao eixo, contendo tanto a seção do terreno como da própria plataforma da rodovia como mostra a Figura 9. O estudo da seção transversal de uma rodovia é de suma importância para verificar a viabilidade da construção da infraestrutura, levando em conta as propriedades do terreno e as necessidades do tráfego projetado. Ele considera aspectos como dimensionamento dos veículos, drenagem, segurança, geotecnia, acessibilidade e conforto, contribuindo para a qualidade e funcionalidade da rodovia.

6.1. PARTES E TIPOS DA SEÇÃO TRANSVERSAL

A seção transversal, definida como a representação geométrica da interseção de tais planos verticais, normais e transversais ao eixo rodoviário com a próprio corpo estradal (denominado gabarito de projeto ou plataforma da rodovia, que é considerada desde o ponto de vista da terraplenagem) e o terreno adjacente, costuma ser realizada em determinados pontos da rodovia, normalmente em cada estaca (ou seja, a cada 20 m), além de outros locais específicos. Os intervalos regulares de 20 metros entre as seções são necessários para se obter uma visão abrangente e representativa do terreno ao longo do trecho e fornecem informações cruciais sobre as variações de elevação, perfis e características do terreno natural, permitindo a realização de análises detalhadas e tomada de decisões adequadas no projeto, assim como os posteriores cálculos de volumes de terraplenagem.

As seções transversais são representadas graficamente em um projeto geométrico por uma linha que indica o nível original do terreno e uma linha que representa a plataforma de terraplenagem da rodovia. A diferença de cota medida no eixo da rodovia entre a plataforma de terraplenagem e o nível do terreno natural é chamada de cota vermelha. Segundo a disposição relativa dessas duas linhas na seção transversal, esta pode ser de três tipos diferentes (Figura 8):

- **Seção em corte:** corresponde quando a rodovia é construída em uma área em que o terreno natural precisa ser removido para nivelar ou criar espaço para a estrada, ou seja, a plataforma da rodovia resulta abaixo do terreno natural.
- **Seção em aterro:** corresponde quando a rodovia é construída em uma área onde o terreno natural está a uma cota inferior da necessária para criar a plataforma de

terraplenagem. Nesse caso, é necessário adicionar material para elevar o nível do terreno.

- **Seção mista:** corresponde quando a rodovia é construída em uma área onde há tanto necessidade de corte quanto de aterro, ou seja, a rodovia resulta de um lado, abaixo do terreno natural, e do outro, acima do terreno natural. Isso pode acontecer quando existe uma transição de trechos completamente em corte para trechos inteiramente em aterro, ou vice-versa, assim como em casos específicos em que a rodovia percorre uma encosta, se adaptando da melhor forma à orografia do terreno. Assim, em uma seção mista, partes da rodovia serão elevadas em relação ao terreno original (aterro) e outras partes precisarão ser escavadas até alcançar uma cota inferior à do terreno natural (corte).

6.2. PROJETO DA SEÇÃO TRANSVERSAL

6.2.1. Seções do terreno

No processo de levantamento de seções transversais de terreno para o projeto geométrico de rodovias, é necessário seguir algumas diretrizes para obter resultados precisos e confiáveis. Assim, é importante que as seções de terreno tenham um comprimento adequado para permitir uma confrontação correta com as seções de projeto. Isso assegura uma estimativa completa da viabilidade das seções projetadas e dos valores das áreas e volumes de terraplenagem envolvidos, evitando erros que possam afetar negativamente o planejamento, a execução e o custo total do projeto de rodovia.

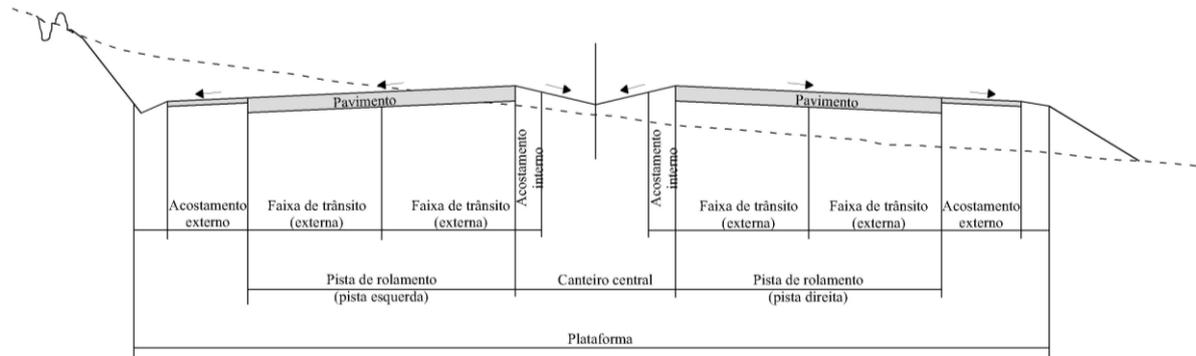
Portanto, seções curtas (offsets fora da seção transversal) não são admissíveis, tanto por erros na representação da seção quanto, sobretudo, pela ausência da definição desses offsets.

6.2.2. Plataforma de terraplenagem

Além da linha da seção do terreno natural, o projeto da seção transversal da rodovia abrange a plataforma da rodovia, ou linha que se pretende alcançar com as atividades de terraplenagem, definida pelo espaço necessário para circulação dos veículos e considerando também a largura das obras de drenagem longitudinal e/ou larguras adicionais para dispositivos de sinalização e defesa, entre outros, e que será diferente segundo se a seção é de corte, de aterro ou mista. Esta linha está compreendida entre os bordos internos dos taludes da rodovia, ou superfícies resultantes das tarefas de escavação ou acumulação de terras para conformar a

própria plataforma até a superfície do terreno natural. Representa a área utilizada para a construção da infraestrutura da rodovia, incluindo a pista de rolamento, acostamentos, dispositivos de drenagem, canteiro central, folgas adicionais e outros elementos (Figura 79).

Figura 79: Seção transversal de rodovia de pista dupla.



Fonte: Autores.

Em uma seção de aterro, a largura da plataforma será determinada pelos limites do aterro construído, da mesma forma que em uma seção de corte a plataforma está compreendida entre os limites dos cortes no terreno, mas precisa prever uma largura maior para permitir a construção de sarjetas necessárias para garantir uma drenagem eficiente das águas pluviais, devido a que se encontra em nível inferior ao terreno natural. Já na seção mista, a plataforma será determinada pelo limite do aterro por um lado e pelo limite do corte do outro, com a mesma necessidade de largura adicional para a parte em corte.

6.2.2.1. Faixa e pista de rolamento

Pode-se definir como faixa de rolamento o espaço dimensionado e destinado à passagem de um veículo por vez. A largura da faixa de rolamento é obtida segundo recomendações da norma (DNER, 1999), onde adiciona-se à própria largura do veículo de projeto uma largura para segurança nas manobras, em função da velocidade de projeto e do nível de conforto de viagem que se deseja proporcionar. Os valores básicos recomendados para pistas pavimentadas em tangentes são apresentados na Tabela 15 em função da classe da rodovia e o relevo da região.

Já a pista de rolamento pode ser definida como a junção das faixas de rolamento contíguas. Assim, a rodovia pode ser: de pista simples, normalmente com duas faixas de rolamento (uma por sentido) e às vezes com uma terceira faixa ou faixa adicional para veículos lentos nos casos necessários de aclives muito íngremes de acordo com a norma; de pista dupla,

com duas ou mais faixas no mesmo sentido (Figura 79); e de pistas múltiplas, com mais de duas pistas.

Tabela 16: Largura das faixas de rolamento em tangentes (em metros).

Classe do projeto	Relevo		
	Plano	Ondulado	Montanho
Classe 0	3,50	3,60	3,60
Classe I	3,60	3,60	3,50
Classe II	3,60	3,50	3,30*
Classe III	3,50	3,30*	3,30
Classe IV-A	3,00	3,00	3,00
Classe IV-B	2,50	2,50	2,50

*Preferivelmente 3,50m, quando esperada alta percentagem de veículos comerciais.

Fonte: DNER, 1999, página 142.

6.2.2.2. Acostamento

O acostamento é o espaço adjacente às faixas de tráfego em uma rodovia, e tem como principal finalidade permitir a parada excepcional de veículos. Ele é projetado e destinado para situações de emergência, oferecendo uma área segura para os motoristas pararem seus veículos temporariamente fora da pista de rolamento.

Ao contrário das faixas de tráfego, o acostamento geralmente não é dimensionado para suportar o trânsito regular de veículos. Sua capacidade de carga é projetada para atender a situações pontuais de emergência, como trocas de pneus, problemas mecânicos ou paradas rápidas.

A norma (DNER, 1999) determina que todas as vias deverão possuir acostamentos, pavimentados ou não. A largura designada para o acostamento deverá ser visível para o motorista e deverá ser mantida uniformemente, sem sofrer estreitamentos desnecessários. A Tabela 16 resume as larguras de acostamento externos a serem adotadas para as diversas classes de projeto e relevo da região. Reduções de valores ali indicados deverão ser justificados.

Além disso, as classes 0 e I-A, por serem de pista dupla, apresentam acostamentos internos, cujos valores em função do relevo e do número de faixas da pista aparecem na Tabela 17.

Tabela 17: Largura dos acostamentos externos (em metros).

Classe do projeto	Relevo		
	Plano	Ondulado	Montanho
Classe 0	3,50	3,00*	3,00*
Classe I	3,00*	2,50	2,50
Classe II	2,50	2,50	2,00
Classe III	2,50	2,00	1,50
Classe IV-A**	1,30	1,30	0,80
Classe IV-B**	1,00	1,00	0,50

*Preferivelmente 3,5 m onde for previsto um volume horário unidirecional de caminhões superior a 250 veículos.

Fonte: DNER, 1999, página 144.

Tabela 18: Largura dos acostamentos internos (em metros) para pistas de mão única - Classe 0 ou I-A.

Número de faixas de rolamento	Relevo		
	Plano	Ondulado	Montanhoso
2	1,20 - 0,60	1,00 - 0,60	0,60 - 0,50
3*	3,00 - 2,50	2,50 - 2,00	2,50 - 2,00
≥4	3,00	3,00- 2,50	3,00 - 2,50

*Quando julgado necessário um acostamento. Em caso contrário, adotar os valores referentes a pistas de 2 faixas.

Fonte: DNER, 1999, página 144.

Os acostamentos poderão incluir também, uma largura adicional, não utilizável pelos veículos, reservada à instalação de dispositivos de sinalização como placas ou de segurança. Essa largura adicional é muito comum nas seções em aterro.

6.2.2.3. Canteiro central

Pode ser definido como a largura do espaço ou dispositivo de separação física localizado entre as pistas em uma rodovia de pista dupla (classes 0 e I-A). Essa largura é obtida ao medir a distância entre os bordos das faixas internas, incluindo as larguras dos acostamentos internos.

O canteiro central é uma área destinada a separar o fluxo de tráfego em direções opostas, proporcionando uma barreira física entre as pistas. Essa separação física contribui para a segurança viária, reduzindo a possibilidade de colisões frontais e ajudando a evitar invasões de faixa entre veículos que trafegam em direções opostas.

A norma (DNER, 1999) estabelece alguns valores recomendados para a serem adotados na largura do canteiro central. A Tabela 18 resume esses valores.

Tabela 19: Largura do canteiro central.

Classe da rodovia	Largura do canteiro central
<u>Classe 0</u>	
Seção transversal restrita*	3 a 7 metros
Valor normal	6 a 7 metros
Desejável***	10 a 18 metros
<u>Classe I-A</u>	
Seção transversal restrita*	3 a 7 metros
Valor necessário nas áreas de retornos e interseções em nível **	≥ 6 metros
Desejável***	10 a 12 metros

*Conforme a largura das faixas de segurança e conversão ou acostamento internos.

**Conforme o veículo de projeto adotado para o local.

***Observar ainda se há necessidade de prever o futuro acréscimo de uma faixa de rolamento ou o apartamento do canteiro por outros meios de transportes.

Fonte: DNER, 1999, página 154.

Ainda segundo a norma (DNER, 1999), os canteiros centrais desejavelmente serão plantados e levemente rebaixados, recebendo onde for necessário a drenagem do acostamento ou faixa interna e, em curvas, também terão uma valeta em seu ponto mais baixo. Além disso, os taludes do canteiro deverão ter valores entre 1:10 e 1:6, de forma a dispensar o emprego de defesas e barreiras.

6.2.2.4. Folgas

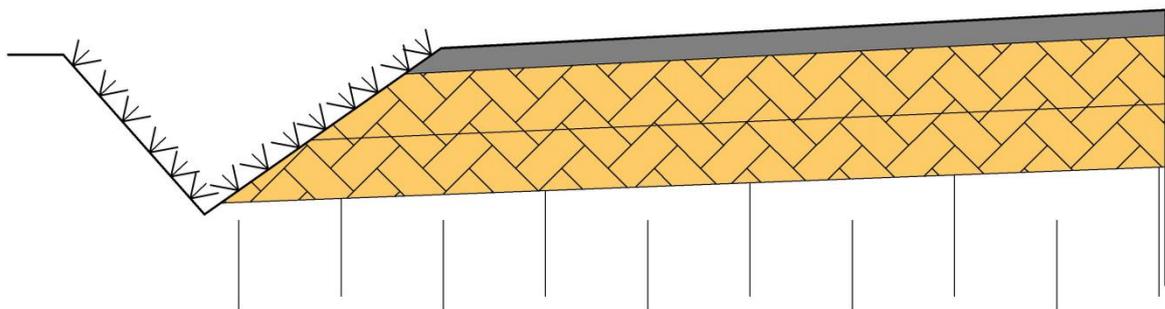
As folgas referem-se à diferença entre as larguras projetadas e as larguras reais de conformação da plataforma, tanto em corte como em aterro. As folgas têm por principal objetivo permitir a execução do pavimento. A estrutura do pavimento (sub-base, base e revestimento) apresenta uma altura além da seção de terraplenagem. Usualmente o acabamento dado a esta estrutura é no formato de talude (com valores v:h entre 1:1 e 1:1,5) (Figura 80).

Além disso, a folga permite a inclusão de sarjeta de drenagem nos cortes. A função principal da sarjeta é coletar as águas de superfície que se acumulam na área do corte e conduzi-las longitudinalmente para fora da seção de corte, evitando que ela se acumule na pista de

rolamento e cause problemas como poças d'água e deterioração da estrutura do pavimento. A necessidade de implantação das sarjetas decorre no aumento da largura da folga prevista na plataforma de terraplenagem.

A norma não estabelece valores para esse tipo de folga, mas as recomendações encontradas na literatura são: para aterros com Classe I recomenda-se 0,30 metros, para as Classes II e III 0,25 metros e para a Classe IV 0,20 metros. Já para cortes, recomenda-se para as Classes I, II e III 0,80 metros e para Classe IV 0,70 metros.

Figura 80: Folgas



Fonte: Autores.

6.2.3. Taludes do terreno

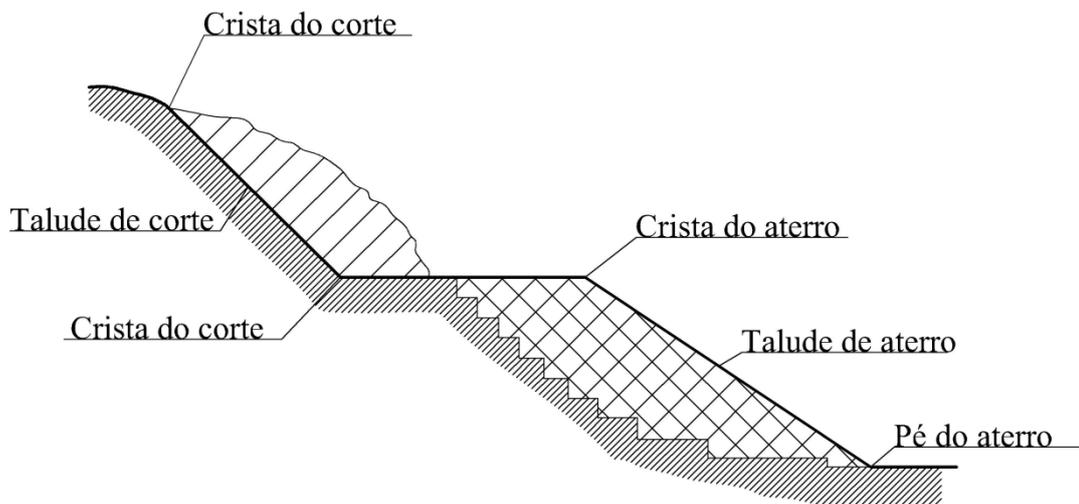
O talude é uma medida utilizada para caracterizar a inclinação das superfícies que delimitam a plataforma de terraplenagem do terreno natural, chamadas de saia do aterro (no caso dos aterros) ou da rampa de corte (no caso dos cortes) em uma rodovia (Figura 81). Além disso, a saia do aterro possui duas interseções importantes, conhecidas como pé do aterro e crista do aterro:

- Pé do Aterro: é a interseção da saia do aterro com o terreno natural existente. Essa interseção marca o limite entre o aterro construído e o terreno original. O pé do aterro é uma área de transição entre o aterro e o terreno natural adjacente.
- Crista do Aterro: é a interseção da saia do aterro com a plataforma da rodovia. Essa interseção marca o topo do aterro e define a largura e o alinhamento da plataforma da rodovia na área do aterro.

No caso dos cortes, esse também possui duas interseções importantes, conhecidas como pé do corte e crista do corte:

- Pé do Corte: é o ponto mais baixo de cada seção transversal ao longo do eixo longitudinal da estrada onde o terreno natural foi cortado ou escavado durante a construção da rodovia.
- Crista do Corte: é o ponto mais alto ao longo do eixo longitudinal da via onde ocorre o corte do terreno natural durante a construção da rodovia.

Figura 81: Taludes do terreno.



Fonte: Autores.

A inclinação dos taludes medida é expressa pela relação v/h , onde v representa o cateto vertical e h representa o cateto horizontal de um triângulo retângulo cuja hipotenusa está formada pela superfície inclinada. Matematicamente, o talude é definido como a tangente do ângulo que a superfície inclinada forma com o horizonte. É uma forma de quantificar a inclinação do terreno e é importante para determinar a estabilidade e segurança do aterro ou corte e prevenir possíveis deslizamentos. Por exemplo, um talude de 1:2 significa que a cada unidade vertical (v), há um aumento de duas unidades horizontais (h). Isso indica que a inclinação é relativamente suave. Já um talude de 1:1 significa que a inclinação é de 45 graus em relação ao horizonte, representando uma inclinação mais acentuada.

Os valores de inclinação dos taludes dependem das condições geológicas e geotécnicas do terreno escavado e dos materiais utilizados na construção da plataforma de terraplenagem da rodovia. A seguir se apresentam algumas recomendações gerais:

- Taludes de corte: sua inclinação deve ser cuidadosamente projetada para garantir a estabilidade dos maciços e evitar o desprendimento de barreiras. A inclinação dos

taludes de corte é variável e depende da natureza do terreno em que a rodovia será construída. A norma estabelece os seguintes valores para taludes de corte:

- Terrenos com possibilidade de escorregamento ou desmoronamento: $V/H = 1/1$.
 - Terrenos sem possibilidade de escorregamento ou desmoronamento: $V/H = 3/2$.
 - Terrenos de rocha viva: mais inclinados ou até verticais.
- Taludes de aterro: sua inclinação depende da altura do terreno onde a rodovia será construída. A norma estabelece os seguintes valores para taludes de aterro:
- Aterros com menos de 3,00 m de altura máxima: $V/H = 1/4$.
 - Aterros com mais de 3,00 m de altura máxima: $V/H = 1/2$.

Quando a altura dos taludes for excessiva ou a estabilidade deles possa ficar comprometida, é recomendado a construção de banquetas (Figura 82).

Figura 82: Rodovia em corte com banquetas e valetas de proteção.



Fonte: CONCRETO FLEXÍVEL. Disponível em: <<https://www.concretoflexivel.com.br/2017/07/valeta-de-protecao-de-corte/>>. Acesso em: 07 out. 2023.

6.2.4. Off-Sets

Os off-sets são dispositivos utilizados para referenciar a posição das marcas físicas correspondentes às cristas dos cortes ou aos pés dos aterros em um projeto de rodovia (Figura 9). Geralmente, esses dispositivos são varas ou estacas que são colocadas em pontos afastados à distância correspondente do eixo da rodovia, segundo as larguras das semiplataformas de terraplenagem e dos taludes de corte ou aterro. O termo “off-set” vem do inglês e indica o afastamento.

O objetivo dos off-sets é servir de referência para a correta execução do projeto geométrico da rodovia, ajudando a garantir que a elevação e a localização da crista do corte ou do pé do aterro sejam precisas. A utilização de off-sets permite aos engenheiros manter um registro claro da posição original dessas marcas, possibilitando que elas sejam reestabelecidas com precisão caso sejam danificadas ou perdidas durante o processo de construção. É de grande relevância em projetos que envolvem movimentação de terra significativa, onde os cortes e aterros são elementos essenciais.

6.2.5. Valeta de proteção de corte

Pode ser definida como um dispositivo de drenagem superficial utilizado nas seções de corte em rodovias. Sua função principal é interceptar as águas superficiais que correm em direção à rampa do corte, redirecionando-as longitudinalmente para fora da seção. Isso contribui para evitar o acúmulo excessivo de água na rampa do corte, o que comprometeria a estabilidade do terreno.

É geralmente constituída por pequenas valas cavadas no terreno natural, posicionadas a montante da seção de corte. Essas valas são projetadas para captar a água que escoar na superfície, impedindo que ela atinja diretamente a rampa. A água é então conduzida ao longo da valeta, seguindo um caminho paralelo à rodovia, até ser desviada para fora da seção de corte (Figura 82).

Durante a construção da valeta, o material resultante da escavação é depositado a jusante da vala, formando um pequeno dique chamado de banqueteta de proteção do corte. Essa banqueteta serve como uma barreira adicional para prevenir eventuais extravasamentos da valeta, evitando que a água retorne à seção de corte (Figura 79).

6.3. CONFORMAÇÃO E DECLIVIDADES DA PISTA E DOS ACOSTAMENTOS

6.3.1. Conformação da pista em tangente

As pistas em tangente são divididas em duas categorias quanto à sua forma na seção transversal: pista de seção transversal abaulada ou pista de seção transversal com caimento simples.

6.3.1.1 Pista de seção transversal abaulada

Esse tipo de seção apresenta uma curvatura sutil ou abaulamento na sua superfície. Em vez de ser completamente plana, a pista possui uma ligeira elevação central em relação aos bordos da faixa de rolamento. A inclinação resultante é projetada intencionalmente para facilitar o escoamento de água da chuva para fora da plataforma e melhorar a drenagem da via, evitando a acumulação da água nela, como foi tratado no capítulo anterior. A pista de seção transversal abaulada é empregada principalmente em rodovias de pista simples e mão dupla. Pode ainda ser empregada em pistas de mão única, especialmente no caso de traçados independentes.

6.3.1.2 Pista de seção com caimento simples

Uma pista de seção com caimento simples, ao contrário da pista de seção transversal abaulada, em que a inclinação ocorre a partir do eixo da pista para cada lado dela, apresenta uma inclinação ao longo de seu comprimento, em um único sentido transversal entre suas bordas (Figura 79). Esse tipo de seção, com declividade transversal constante favorece que algumas instalações de drenagem sejam necessárias somente em um lado da pista, e facilita também a execução do pavimento. Porém, pode apresentar alguns aspectos desvantajosos como um maior acúmulo de água pluviais na faixa de rolamento de cota mais baixa e/ou um constante desnível entre os bordos da pista. Esse tipo de seção é empregado normalmente em rodovias de pista dupla e em alguns casos especiais de pistas de mão única.

6.3.2. Declividades da pista e dos acostamentos em tangente

Declividades transversais elevadas são importantes para garantir e acelerar o escoamento das águas pluviais, porém, valores baixos são preferíveis tanto por motivos estéticos quanto operacionais e de segurança, decorrentes de uma menor aceleração transversal. A condição básica para a adoção de valores baixos de declividades, segundo a norma (DNER,

1999), é que os pavimentos sejam de alta qualidade e elevado grau de acabamento, com reduzido grau de absorção e retenção de água.

Segundo a norma (DNER, 1999), a declividade transversal mais recomendada para pistas é de 2% para pavimentos betuminosos de alta qualidade e 1,5% para pavimentos de concreto de cimento, como foi tratado no capítulo 5. No caso de pistas onde o pavimento possui um maior grau de porosidade, poderá ser adotada uma declividade de 2,5% com limite superior de 3%. Já no caso de pistas com caimento simples e mais de duas faixas, pode-se adotar um valor superior a 2% em decorrência da drenagem. Pistas não pavimentadas, terão declividades transversais de 3% e excepcionalmente de 4%.

A declividade normal de acostamentos, pavimentados ou não, é determinada pela norma (DNER, 1999) em 5%. Acostamentos e faixas de segurança internos poderão drenar para a pista ou para o canteiro, a depender das circunstâncias específicas.

6.3.3. Declividades da pista e dos acostamentos em curva

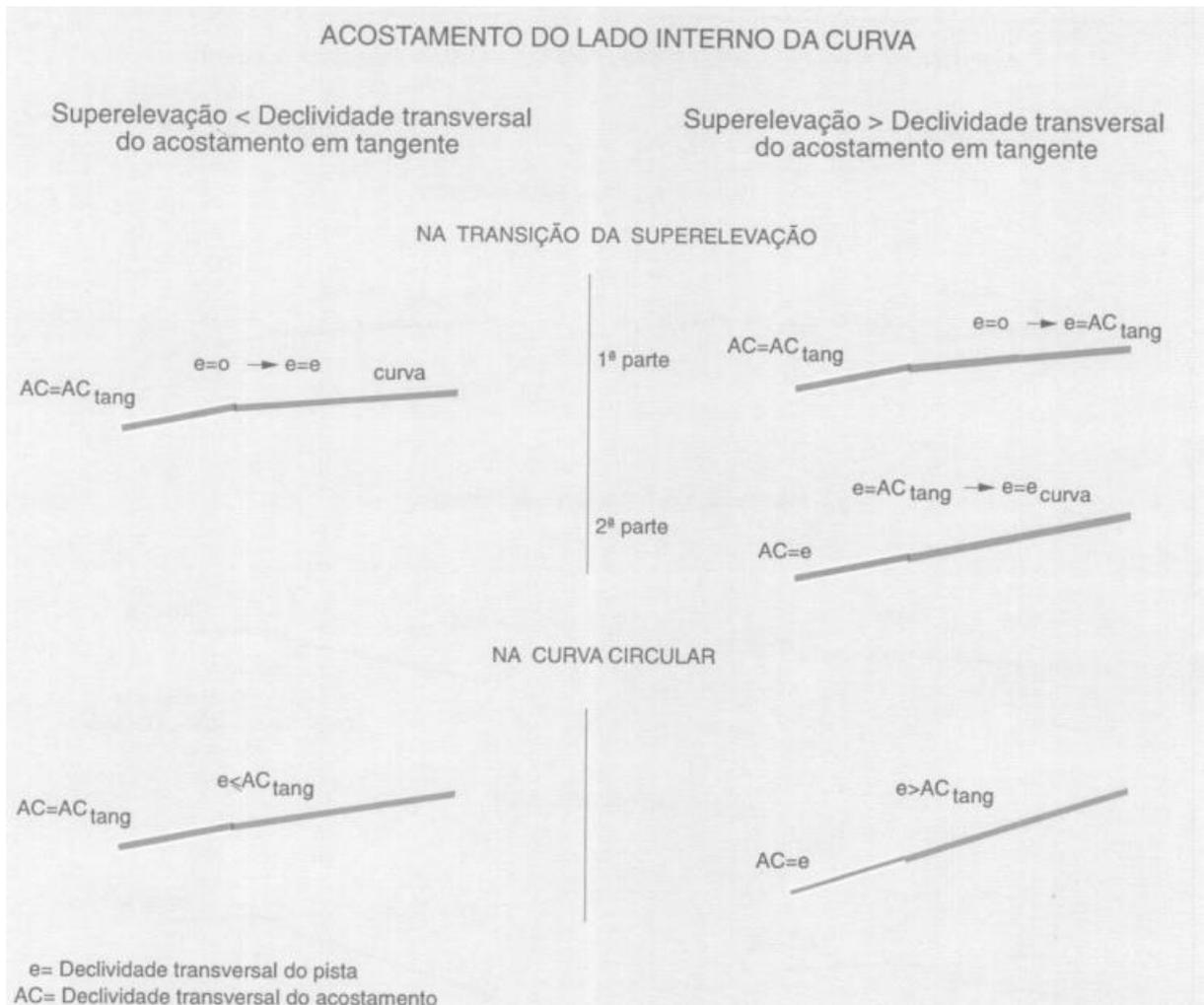
Nas curvas, a declividade transversal da pista passa a estar influenciada pela necessidade de superelevação. Portanto, os valores adotados para as faixas de rolamento serão os correspondentes à distribuição da superelevação praticada, lembrando que nesses casos a direção de caimento das águas será sempre para o lado interno da curva, girando em torno ao eixo para manter a cota do greide calculada no projeto altimétrico. Dessa forma, o bordo da faixa externa da curva se eleva em relação à situação em tangente e ao eixo, enquanto o bordo da faixa interna da curva desce (Figura 9).

Por sua parte, a declividade dos acostamentos em curva é calculada segundo se trata do acostamento do lado interno da curva ou do acostamento ao lado externo.

6.3.3.1 Acostamento ao lado interno das curvas

Segundo a norma (DNER, 1999), quando a taxa de superelevação for inferior à declividade do acostamento em tangente (5%), esta última será mantida. Quando for superior, a declividade do acostamento será igual à da pista. A partir desse ponto, o acostamento interno girará, acompanhando a declividade (Figura 83). Na saída da curva, em que ocorre a distribuição da superelevação de forma inversa, quando a taxa de superelevação na curva passar a ser inferior à declividade do acostamento em tangente, esta última já será mantida.

Figura 83: Declividade transversal do acostamento do lado interno de curvas horizontais.



Fonte: DNER, 1999, página 151.

6.3.3.2 Acostamento ao lado externo das curvas

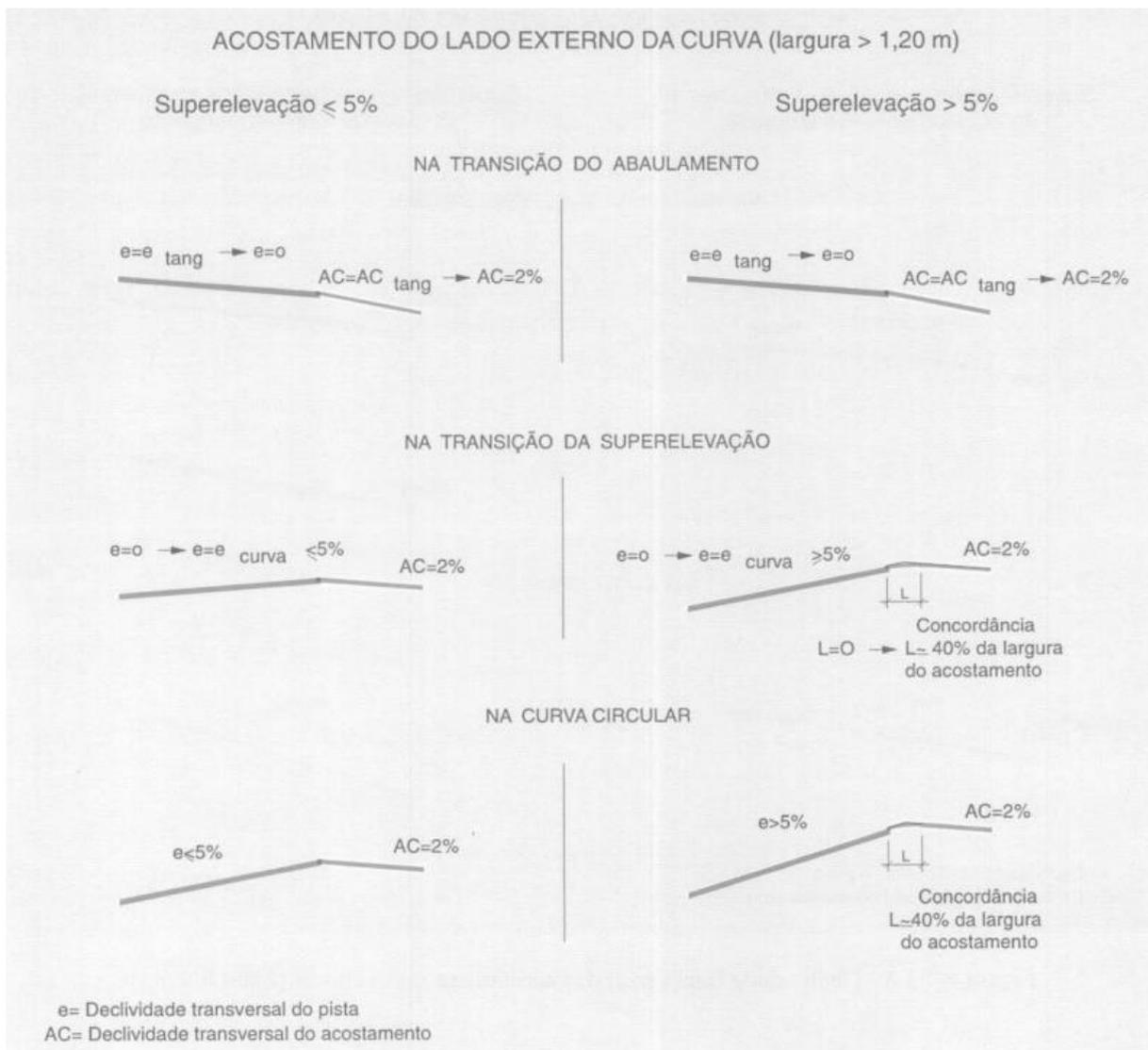
São possíveis duas circunstâncias para a declividade transversal dos acostamentos situados ao lado externo das curvas.

A primeira circunstância, segundo a norma (DNER, 1999), prevê que o acostamento terá a mesma declividade transversal, em valor e sentido, que a pista. Essa hipótese, reduz as restrições à operação, tendo em vista a continuidade física e visual dos elementos superficiais que se estendem além do bordo da pista e possui ainda uma maior facilidade construtiva. É recomendada para faixas de segurança ou acostamentos estreitos (largura < 1,20m).

Já a segunda circunstância, também apresentada na norma (DNER, 1999), prevê que a declividade transversal do acostamento será orientada para o lado externo da curva. Essa

hipótese, beneficia a condução para fora da pista das águas pluviais e dos detritos que inevitavelmente atingem a superfície do acostamento e tendem a alcançar a pista principal. Também favorece o afastamento da pista, física e psicologicamente dos veículos parados no acostamento, como também a redução das rampas de superelevação e da sinuosidade do perfil do bordo do acostamento (Figura 84). É recomendada para os casos gerais, de acostamentos largos (largura > 1,20m).

Figura 84: Declividade transversal do acostamento do lado externo de curvas horizontais (largura > 1,20m).



Fonte: DNER, 1999, página 152.

Nesse segundo caso, o acostamento externo terá o valor máximo da diferença algébrica em relação a 7%, mas nunca será inferior a 2%. Ou seja, o acostamento mantém o valor de -5% (valor negativo porque está inclinado para fora da pista em relação ao eixo) e só quando a pista alcançar o valor de +2% (positivo porque está inclinada para dentro da pista, se elevando em

relação ao eixo), começará a girar, diminuindo seu valor absoluto para manter como máximo uma diferença de 7% em relação à pista. Assim, por exemplo, quando a distribuição da superelevação alcançar +3%, o acostamento terá declividade -4%, e continuará mudando até chegar ao valor de -2%, no qual ficará fixado. Mesmo que o valor da superelevação da pista seja superior a 5% (em valor absoluto), o acostamento externo ficará com uma inclinação para fora da plataforma de -2%. Na saída da curva, se produz o processo inverso.

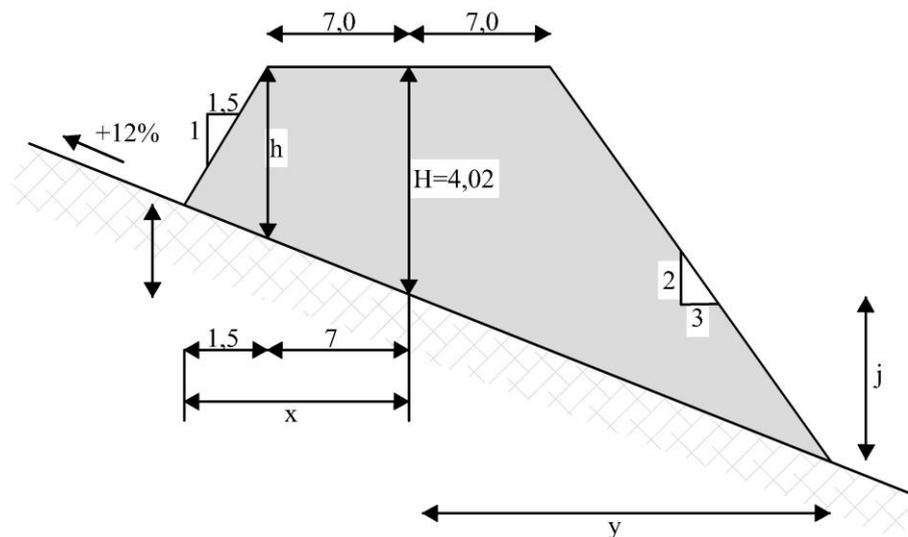
6.4. EXERCÍCIOS

I. Considerando que, para uma determinada estaca, a cota vermelha na seção de aterro é de 4,020 m, a declividade do terreno da direita para a esquerda é de +12,00% e os taludes de aterro são de 2:3 (V:H), qual é a distância para a marcação do pé de aterro da estaca? Se a cota do terreno no eixo é de 654,980 m, qual é a cota do pé de aterro?

Resposta:

Pé esquerdo $x = 11,042\text{m}$, cota 656,305m

Pé direito $y = 15,890\text{m}$, cota 653,073m.



II. Com base nos dados da Figura 85, procedentes dos relatório planimétricos de um trecho rodoviário classe II em região ondulada de terrenos arenosos com escorregamento e veículos de projeto CO, com revestimento de concreto de cimento, distribuição simétrica da superlargura e distribuição da superlevação mediante giro pelo eixo.



Figura 85: Exercício de cálculo de seções transversais.

PI	ESTAQUEAMENTO (Est. ou km)				PARÂMETROS DA CURVA							
	PC ou TE	EC	CE	PT ou ET	AC (°'")		R (m)	Lc1 (m)	Lc2 (m)	Dc (m)	T1 (m)	T2 (m)
PP				0+000,000								
1	????	????	0+936,612	1+026,612	43°12'19,80"	D	180	????	????	45,734	????	????
2	????	????	????	????	42°15'02,15"	D	180	90	90	42,734	115,180	115,180
3	3+286,279	3+376,279	3+432,523	3+522,523	41°53'44,74"	D	????	90	90	56,244	122,130	122,130
4	4+769,742	4+859,742	4+866,774	????	27°47'51,56"	E	200	????	????	???	94,832	94,832
5	5+785,667	5+875,667	5+901,588	5+991,588	????	E	180	????	????	25,921	105,580	105,580
6	6+731,726	????	????	7+010,979	60°14'28,15"	D	????	90	90	99,253	????	????
PF	7+446,818											

PI	ALINHAMENTO			km ou est	Cotas (m)		INCLINAÇÃO DO TERRENO (Medido da esquerda para a direita na seção transversal)
	Az (°'")	IntTan (m)	ΔPI (m)		Terreno	Greide	
PP	????	800,878	917,802	0+740	521,356	518,874	-10,00%
1	275°01'11,47"	972,155	1204,260	0+900	518,927	516,349	-8,50%
2	317°16'13,62"	1064,778	????	1+500	512,616	512,934	-1,00%
				2+260	510,753	508,753	5,00%
3	????	????	1464,180	3+500	505,453	503,718	-4,00%
4	331°22'06,80"	828,892	1029,310	4+200	502,934	501,951	-2,50%
5	294°28'11,28"	740,138	????	4+860	500,128	505,302	-2,50%
				5+020	498,521	509,987	-3,80%
6	354°42'39,42"	????	586,259	6+000	497,748	489,029	-6,00%
PF				7+100	493,951	494,927	2,60%

Fonte: Autores.

- A) A largura da plataforma de terraplenagem na estaca 0+740;
- B) A largura da plataforma de terraplenagem na estaca 5+020;
- C) A cota do bordo direito da plataforma de terraplenagem na estaca 2+260;
- D) A diferença entre as cotas dos bordos da plataforma de terraplenagem na estaca 0+900;
- E) A distância horizontal entre o eixo e o offset direito na estaca 2+260;
- F) A distância horizontal entre o eixo e o offset esquerdo na estaca 4+860;
- G) A cota do bordo esquerdo da plataforma de terraplenagem na estaca 6+000;
- H) A distância horizontal entre o eixo e o offset esquerdo na estaca 6+000;
- I) A distância horizontal entre o eixo e o offset esquerdo na estaca 3+500;
- J) A cota do offset direito na estaca 3+500.

Resposta:

- A) 13,600 m
- B) 12,500 m
- C) 508,563 m
- D) 0,789 m
- E) 9,415 m
- F) 15,040 m
- G) 488,838 m
- H) 14,821 m
- I) 9,094 m
- J) 503,483 m.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO - American Association of State Highway and Transportation Officials. **A Policy on Geometric Design of Highways and Streets**. Washington, 2001.

ALBANO, João Fortini. **Rodovias: introdução ao projeto geométrico, projeto de**

BRASIL. **Código de Trânsito Brasileiro - CTB**. Lei nº 9.503, de 23 de setembro de 1997.

DAER - Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem. **Normas de Projetos Rodoviários**. Volume 1. Porto Alegre, fevereiro de 1991.

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Diretoria de Desenvolvimento Tecnológico. Divisão de Capacitação Tecnológica. **Manual de projeto geométrico de rodovias rurais**. Rio de Janeiro, 1999. 195p. (IPR. Publ., 706).

GARCIA, Daniel Sergio Presta. **Apostila de Rodovias 2020/1**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2020.

LEE, Shu Han. **Introdução ao projeto geométrico de rodovias**. Florianópolis, 2000.

PEREIRA, D. M. et al. **Projeto geométrico de rodovias**. Curitiba, 2010.

DADOS DOS AUTORES



Alejandro Ruiz-Padillo é doutor em Engenharia Civil com ênfase em Transportes, professor adjunto no Departamento de Transportes da Universidade Federal de Santa Maria e fundador do Laboratório de Mobilidade e Logística, onde desenvolve projetos de ensino, pesquisa e extensão ligados aos sistemas de transporte, engenharia de tráfego, segurança viária e mobilidade sustentável.



Rafael Cezar Wasqueviti é acadêmico do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Maria e membro do Laboratório de Mobilidade e Logística, onde é bolsista do projeto de ensino “Aplicação de metodologias ativas e experiências inovadoras de ensino-aprendizagem tecnológico” na área de projeto geométrico de rodovias e desenvolvimento de recursos didáticos.



Thaís Ross Dutra é acadêmica do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Maria e membro do Laboratório de Mobilidade e Logística, onde é bolsista do projeto de ensino “Aplicação de metodologias ativas e experiências inovadoras de ensino-aprendizagem tecnológico” na área de projeto geométrico de rodovias e desenvolvimento de recursos didáticos.



Tatiana Cureau Cervo possui graduação e mestrado em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Santa Maria e doutorado em Engenharia de Transportes pela POLI/USP. É Professora Associada no Departamento de Transportes da UFSM. Tem experiência na área de Engenharia Civil, com ênfase em materiais alternativos e sustentáveis para pavimentos, rodovias, ferrovias e infraestrutura de transporte.

ALEJANDRO RUIZ-PADILLO, RAFAEL CEZAR WASQUEVITI,
THAIS ROOS DUTRA, TATIANA CUREAU CERVO

PROJETO GEOMÉTRICO DE RODOVIAS

Desde uma introdução às normas e classificações rodoviárias até a exploração das complexidades do traçado, planimetria, altimetria e seção transversal, este livro busca oferecer de forma didática os conceitos e etapas básicas para estudo e desenvolvimento do projeto geométrico de rodovias. Os leitores serão apresentados às equações e tabelas essenciais, bem como às técnicas e princípios que orientam a tomada de decisões no estudo do traçado de uma rodovia, escolha de diretrizes e projeto de curvas horizontais e verticais. Além disso, aspectos essenciais como superelevação, superlargura e elementos da seção transversal são detalhados, proporcionando um entendimento abrangente e prático a engenheiros civis e de transportes atuantes na área rodoviária.



ISBN 978-85-64049-24-6