

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA



Lorival Görgen Filho

**ANÁLISE CRÍTICA DOS TRAÇADOS
GEOMÉTRICOS DAS RODOVIAS PRESIDENTE
DUTRA E AIRTON SENNA/CARVALHO PINTO,
TRECHO ENTRE TAUBATÉ-SP E SÃO
PAULO-SP**

Trabalho de Graduação
2018

**Curso de Engenharia
Civil-Aeronáutica**

Lorival Görgen Filho

**ANÁLISE CRÍTICA DOS TRAÇADOS
GEOMÉTRICOS DAS RODOVIAS PRESIDENTE
DUTRA E AIRTON SENNA/CARVALHO PINTO,
TRECHO ENTRE TAUBATÉ-SP E SÃO
PAULO-SP**

Orientador

Ten. Cel. Eng. Ronaldo Gonçalves de Carvalho (ITA)

ENGENHARIA CIVIL-AERONÁUTICA

**SÃO JOSÉ DOS CAMPOS
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA**

2018

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Divisão de Informação e Documentação

Görgen Filho, Lorival

Análise crítica dos traçados geométricos das rodovias Presidente Dutra e Airton Senna/Carvalho Pinto, trecho entre Taubaté-SP e São Paulo-SP / Lorival Görgen Filho.

São José dos Campos, 2018.

54f.

Trabalho de Graduação – Curso de Engenharia Civil-Aeronáutica– Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2018. Orientador: Ten. Cel. Eng. Ronaldo Gonçalves de Carvalho.

1. Rodovia. 2. Projeto Geométrico. 3. Alinhamento Horizontal. I. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. II. Título.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

GÖRGEN FILHO, Lorival. **Análise crítica dos traçados geométricos das rodovias Presidente Dutra e Airton Senna/Carvalho Pinto, trecho entre Taubaté-SP e São Paulo-SP.** 2018. 54f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Lorival Görgen Filho

TÍTULO DO TRABALHO: Análise crítica dos traçados geométricos das rodovias Presidente Dutra e Airton Senna/Carvalho Pinto, trecho entre Taubaté-SP e São Paulo-SP.

TIPO DO TRABALHO/ANO: Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) / 2018

É concedida ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica permissão para reproduzir cópias deste trabalho de graduação e para emprestar ou vender cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste trabalho de graduação pode ser reproduzida sem a autorização do autor.



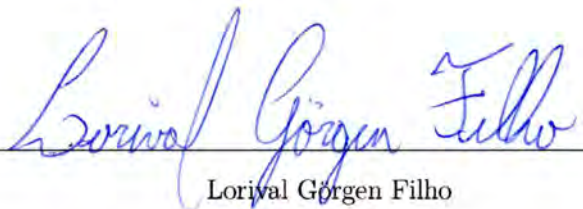
Lorival Görgen Filho

Rua H8A, 114

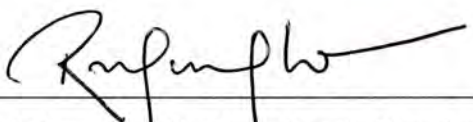
12.228-460 – São José dos Campos-SP

**ANÁLISE CRÍTICA DOS TRAÇADOS
GEOMÉTRICOS DAS RODOVIAS PRESIDENTE
DUTRA E AIRTON SENNA/CARVALHO PINTO,
TRECHO ENTRE TAUBATÉ-SP E SÃO
PAULO-SP**

Essa publicação foi aceita como Relatório Final de Trabalho de Graduação



Lorival Gorgen Filho
Autor



Ten. Cel. Eng. Ronaldo Gonçalves de Carvalho (ITA)
Orientador



Prof. Dr. Eliseu Lucena Neto
Coordenador do Curso de Engenharia Civil-Aeronáutica

São José dos Campos, 14 de novembro de 2018.

À minha família por sempre me apoiar
nos meus objetivos e por me ajudar a
lutar diante dos desafios.

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço a Deus pela oportunidade de estudar.

Aos meus pais, Lorival e Zilda, e à minha irmã, Indiara, pelo apoio durante todos esses anos para que eu pudesse me formar no Instituto Tecnológico de Aeronáutica.

À minha namorada, Kauane, por todo o carinho e atenção, por sempre torcer por mim e, mesmo distante, se fazer tão presente.

A todos os meus professores, por fazerem parte da minha formação.

Aos meus colegas, por todos os desafios que enfrentamos juntos, ajudando uns aos outros.

Aos "Amigos do Tutubas", por atravessarmos juntos o desafio mais difícil do nosso curso.

Ao meu orientador, Ten. Cel. Ronaldo, pela orientação e pela confiança depositada em mim na realização deste trabalho.

*“O sucesso normalmente vem para
quem está ocupado demais
para procurar por ele.”*

— HENRY DAVID THOREAU

Resumo

O presente trabalho de graduação se propõe a realização de um estudo comparativo entre os traçados da Rodovias Presidente Dutra, projetado e construído na década de 50, e do sistema Airton Senna / Carvalho Pinto, datado das décadas de 80 e 90, no trecho entre as cidades de Taubaté-SP e São Paulo-SP, com o objetivo de se verificar eventuais não conformidades com os requisitos atuais de projeto geométrico de estradas vigentes no Brasil. O trabalho iniciar-se-á com uma revisão bibliográfica na área de projeto geométrico de estradas. Em seguida, deverão ser obtidas imagens de alta definição de toda a área de estudo e realizado o georreferenciamento das mesmas. Com o auxílio do software *Bentley PowerCivil* será então modelado o traçado geométrico das duas rodovias de forma a se obter todos os parâmetros de alinhamento horizontal (ângulos de deflexão, comprimentos de tangentes, espirais e curvas circulares, raios de curva, etc.). Por fim, será realizada a análise dos elementos geométricos para identificação de eventuais não conformidades com as normas técnicas vigentes.

Abstract

The current undergraduate thesis purposes to accomplish a comparative study between the road horizontal alignments of Presidente Dutra Highway, designed and built in the 1950s, and Ayrton Senna / Carvalho Pinto Highway, from the 80s and 90s, on the way between Taubate-SP and Sao Paulo-SP, aiming to check over eventual non-conformities with current road alignment design requirements. This thesis starts with a extensive bibliographic review of road alignment design. Then, high definition images of the referred area must be got and properly georeferenced. Subsequently, assisted by Bentley Power-Civil software, the both road horizontal alignments are designed to measure all respective parameters (deflection angles, tangent lengths, spiral and circle curves, radius of curvature, etc.). At last, analysis concerning geometrical elements is done to identify eventual non-conformities with applicable current standards.

Lista de Figuras

FIGURA 1.1 – Via Dutra em Taubaté-SP.	16
FIGURA 1.2 – Corredor Ayrton Senna / Carvalho Pinto.	17
FIGURA 2.1 – Curva Circular Simples.	19
FIGURA 2.2 – Esquema de forças de um veículo em curva. (DNER, 1999)	21
FIGURA 2.3 – Valores máximos admissíveis para os coeficientes de atrito transversal. (DNER, 1999)	22
FIGURA 2.4 – Valores máximos admissíveis para os coeficientes de atrito transversal. (PONTES FILHO, 1998)	22
FIGURA 2.5 – Clotóide. (PONTES FILHO, 1998)	23
FIGURA 2.6 – Valores-limite dos raios R acima dos quais podem ser dispensadas curvas de transição. (DNER, 1999)	23
FIGURA 2.7 – Curva horizontal com transição (simétrica). (PONTES FILHO, 1998) .	24
FIGURA 2.8 – Classes de projeto (Áreas Rurais). (PONTES FILHO, 1998)	27
FIGURA 2.9 – Velocidades diretrizes. (DNER, 1999)	28
FIGURA 2.10 – Tangentes longas concordadas com curvas de raio pequeno. (DNER, 1999)	30
FIGURA 2.11 – Curvas de raio longo concordadas com tangentes curtas. (DNER, 1999)	30
FIGURA 2.12 – Critérios para orientar a escolha dos raios de curvas sucessivas. (DNER, 1999)	32
FIGURA 3.1 – Mosaico das rodovias.	33
FIGURA 4.1 – Sobreposição de gráficos para classificação de inter-relacionamento de curvas sucessivas da Rodovia Presidente Dutra.	40

FIGURA 4.2 – Sobreposição de gráficos para classificação de inter-relacionamento de curvas sucessivas da Rodovia Ayrton Senna / Carvalho Pinto. . .	41
FIGURA 4.3 – Sonorizador.	43

Lista de Tabelas

TABELA 4.1 – Tangentes longas da Rodovia Presidente Dutra.	36
TABELA 4.2 – Desenvolvidos mínimos das curvas da Rodovia Presidente Dutra.	37
TABELA 4.3 – Comprimentos de tangentes intermediárias da Rodovia Presidente Dutra.	38
TABELA 4.4 – Comprimentos de tangentes intermediárias da Rodovia Ayrton Senna / Carvalho Pinto.	38
TABELA 4.4 – Comprimentos de tangentes intermediárias da Rodovia Ayrton Senna / Carvalho Pinto.	39
TABELA 4.5 – Classificação de inter-relacionamento de curvas sucessivas da Rodovia Ayrton Senna / Carvalho Pinto.	41
TABELA 4.5 – Classificação de inter-relacionamento de curvas sucessivas da Rodovia Ayrton Senna / Carvalho Pinto.	42
TABELA 4.6 – Raios muito grandes da Rodovia Presidente Dutra.	42
TABELA 4.7 – Maiores raios de curva da Rodovia Ayrton Senna / Carvalho Pinto.	42
TABELA 4.7 – Maiores raios de curva da Rodovia Ayrton Senna / Carvalho Pinto.	43
TABELA A.1 – Tangentes da Rodovia Presidente Dutra.	46
TABELA A.1 – Tangentes da Rodovia Presidente Dutra.	47
TABELA A.2 – Tangentes da Rodovia Ayrton Senna / Carvalho Pinto.	47
TABELA A.2 – Tangentes da Rodovia Ayrton Senna / Carvalho Pinto.	48
TABELA A.2 – Tangentes da Rodovia Ayrton Senna / Carvalho Pinto.	49
TABELA A.2 – Tangentes da Rodovia Ayrton Senna / Carvalho Pinto.	50
TABELA A.3 – Curvas da Rodovia Presidente Dutra.	50
TABELA A.3 – Curvas da Rodovia Presidente Dutra.	51

TABELA A.4 –Curvas da Rodovia Ayrton Senna / Carvalho Pinto.	51
TABELA A.4 –Curvas da Rodovia Ayrton Senna / Carvalho Pinto.	52
TABELA A.4 –Curvas da Rodovia Ayrton Senna / Carvalho Pinto.	53
TABELA A.4 –Curvas da Rodovia Ayrton Senna / Carvalho Pinto.	54

Sumário

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Objetivo	15
1.2	Motivação	15
1.3	Rodovia Presidente Dutra	15
1.4	Corredor Ayrton Senna / Carvalho Pinto	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	Projeto Geométrico de Estradas	18
2.1.1	Curvas Horizontais Circulares	18
2.1.2	Raio Mínimo de Curvatura Horizontal	20
2.1.3	Curvas Horizontais de Transição	22
2.1.4	Comprimento Mínimo de Transição	25
2.1.5	Comprimento Máximo de Transição	26
2.2	Classificação Técnica de Rodovias	26
2.2.1	Classe de Projeto	26
2.2.2	Classificação de Relevo - AASHTO	27
2.2.3	Velocidade Diretriz	28
2.3	Recomendações de Alinhamento Horizontal	29
3	ABORDAGEM METODOLÓGICA	33
3.1	Obtenção de Imagens	33
3.2	Desenho de Traçado	34
3.3	Limitantes de Alinhamento Horizontal	34
3.4	Observação sobre Alinhamento Vertical	34

4	ANÁLISE CRÍTICA DE RESULTADOS	36
4.1	Resultados	36
4.1.1	Recomendação 1 - Tangentes Longas	36
4.1.2	Recomendação 2 - Ângulos Centrais Muito Pequenos	37
4.1.3	Recomendação 3 - Curvas de Transição	37
4.1.4	Recomendação 4 - Curvas Sucessivas de Mesmo Sentido	37
4.1.5	Recomendação 5 - Curvas Sucessivas de Sentidos Opostos	39
4.1.6	Recomendação 6 - Inter-relacionamento de Curvas Sucessivas	39
4.1.7	Recomendação 7 - Raios Muito Grandes	42
4.2	Discussões	43
5	COMENTÁRIOS FINAIS	44
	REFERÊNCIAS	45
	APÊNDICE A – PARÂMETROS DE ALINHAMENTO HORIZONTAL .	46
A.1	Tangentes	46
A.2	Curvas	50

1 Introdução

1.1 Objetivo

O objetivo deste trabalho de graduação é verificar eventuais inconformidades de traçado das rodovias Presidente Dutra e sistema Airton Senna / Carvalho Pinto, no trecho entre as cidades de Taubaté-SP e São Paulo-SP, em comparação aos atuais requisitos de projeto geométrico de estradas em vigência no Brasil (DNER, 1999).

Como resultado, espera-se obter uma maior quantidade de inconformidades na Rodovia Presidente Dutra, em comparação ao sistema Airton Senna / Carvalho Pinto, por ser mais antiga e, conseqüentemente, mais distante dos conceitos de projeto desenvolvidos e praticados atualmente. Ademais, deseja-se discutir que medidas podem ser tomadas a fim de mitigar os riscos de acidentes causados por essas inconformidades.

1.2 Motivação

A rodovia Presidente Dutra foi projetada e construída na década de 50, ao passo que o sistema Airton Senna / Carvalho Pinto teve seu processo de projeto e construção nas décadas de 80 e 90. Esse distanciamento histórico refletiu em significativas diferenças entre os conceitos de projeto de seus traçados e ainda em inconformidades relativas às normas técnicas vigentes. A análise comparativa dos parâmetros de alinhamento horizontal dos dois trechos, a fim de se apontar tais inconformidades, motiva a realização do presente trabalho.

1.3 Rodovia Presidente Dutra

A Rodovia Presidente Dutra, conhecida também como Via Dutra, liga as cidades do Rio de Janeiro e São Paulo, estendendo-se por 402km. Ela faz parte da BR-116, a maior rodovia totalmente pavimentada do Brasil, com 4490km de extensão. A Via Dutra é atualmente considerada a mais importante rodovia do Brasil, não só por ligar as duas

maiores metrópoles nacionais, como também por atravessar uma das regiões mais ricas do País, o Vale do Paraíba.



FIGURA 1.1 – Via Dutra em Taubaté-SP.

A primeira ligação rodoviária asfaltada entre as cidades de Rio de Janeiro e São Paulo foi aberta pelo governo do então presidente Washington Luis e inaugurada em 5 de maio de 1928, com o nome de "Rio-São Paulo". Em 1938, foi inaugurado, na rodovia, o monumento rodoviário atualmente conhecido como Monumento Rodoviário da Rodovia Presidente Dutra.

No final da década de 1940, a industrialização e a necessidade de uma ligação viária mais segura e eficaz entre as duas maiores cidades brasileiras levaram à construção da atual Via Dutra, inaugurada em 19 de janeiro de 1951 pelo presidente Eurico Gaspar Dutra. Com a inauguração da nova estrada, a antiga estrada Rio-São Paulo deixou de ser utilizada, exceto em dois trechos, que formam as atuais rodovias BR-465 e RJ-139. A BR-2, como era conhecida então, possuía pista simples em grande parte do seu percurso, e possuía trechos duplicados apenas entre as cidades de São Paulo e Guarulhos, e na Baixada Fluminense.

Durante a década de 1960, a pista recebeu diversas obras de duplicação e, finalmente em 1967, foi entregue a via duplicada em toda a sua extensão, tornando-se a principal autoestrada do país.

Três décadas mais tarde, em março de 1996, a operação da rodovia foi concedida à iniciativa privada. Atualmente, a rodovia é administrada pela empresa NovaDutra S/A, a qual realizou obras de melhoria e ampliação da pista, como pistas marginais na cidade de São José dos Campos-SP.

1.4 Corredor Ayrton Senna / Carvalho Pinto

O sistema composto pelas rodovias Ayrton Senna e Governador Carvalho Pinto faz a ligação entre a região metropolitana de São Paulo e o Vale do Paraíba, e possibilita o acesso ao Rio de Janeiro, às praias do Litoral Norte e à região serrana de Campos do Jordão, cidade que atrai milhares de turistas nos meses de inverno.

Esse sistema tornou-se uma das mais importantes vias para a distribuição da produção industrial das cerca de duas mil empresas instaladas na região do Vale do Paraíba, com destaque para a forte presença das indústrias do setor automobilístico, como Volkswagen, GM e Ford, e siderúrgico, como a Usiminas.



FIGURA 1.2 – Corredor Ayrton Senna / Carvalho Pinto.

A Rodovia Ayrton Senna, antiga Rodovia dos Trabalhadores, foi inaugurada em 1982, aliviando o tráfego da então existente Via Dutra. Com extensão inicial de 50 quilômetros, a estrada passou a interligar a capital à cidade de Guararema, na região do Alto Tietê. Seu traçado é paralelo à Rodovia Presidente Dutra e a estrada cruza, ainda em seu início, na divisa entre São Paulo e Guarulhos, o Parque Ecológico do Tietê. À época, foi inaugurada também uma ligação entre a rodovia e o Aeroporto Internacional de Guarulhos, a rodovia Hélio Smidt (SP-019).

Em 1990, começou a ser construída a continuação da então Rodovia dos Trabalhadores. Inaugurada em 1994, já sob o nome de Rodovia Carvalho Pinto e com 70 quilômetros de extensão, a estrada liga Guararema a Taubaté.

Atualmente, o lote do corredor Ayrton Senna / Carvalho Pinto é administrado pela empresa Ecopistas e recebe cerca de 150 mil veículos pedagiados por dia, nos dois sentidos, fazendo parte do Corredor de Exportação Campinas – Vale do Paraíba Litoral Norte.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Projeto Geométrico de Estradas

De acordo com Pontes Filho (PONTES FILHO, 1998), a geometria de uma estrada é definida pelo traçado do seu eixo em planta e pelos perfis longitudinal e transversal. De maneira simplificada, o traçado em planta é composto de trechos retos concordados por curvas horizontais que são usadas, em geral, para desviar de obstáculos que não possam ser vencidos economicamente.

Escolhido o raio das curvas, ele afirma que essas devem garantir:

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

2.1.1 Curvas Horizontais Circulares

As curvas horizontais possuem, na grande maioria dos projetos, duas configurações geométricas, curva circular simples e curva circular com transição. Particularmente, a curva horizontal circular simples, apesar de preterida nos projetos atuais em relação à curva de transição, compõe o trecho central dessa última e seus principais elementos geométricos são apresentados na Figura 2.1.

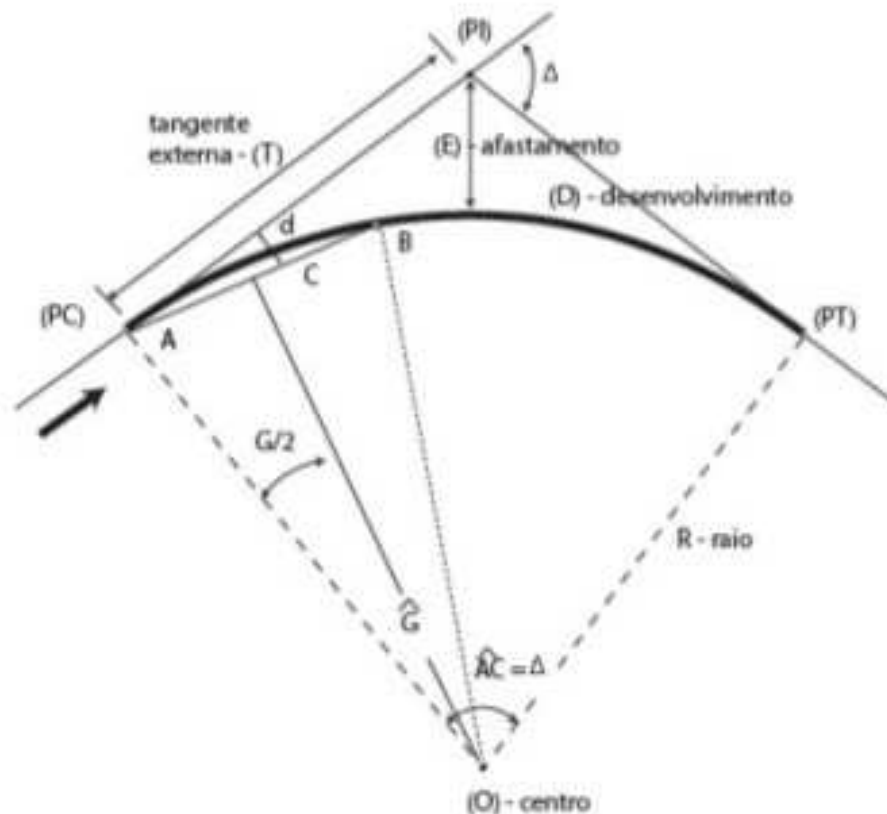


FIGURA 2.1 – Curva Circular Simples.

- Ponto de Curva (PC): ponto de início de curva circular;
- Ponto de Tangente (PT): ponto de início de tangente;
- Ponto de Interseção (PI): ponto de interseção das tangentes;
- Raio (R): raio do arco de circunferência;
- Ângulo Central (AC): ângulo formado pelos raios que passam pelos pontos PC e PT e que se interceptam no centro O;
- Ângulo de Deflexão (Δ): ângulo formado pelas tangentes no ponto PI numericamente equivalente ao ângulo AC;
- Tangente (T): segmento de reta que une um ponto extremo do arco de circunferência (PC ou PT) ao ponto de interseção (PI);
- Desenvolvimento (D): comprimento do arco de circunferência;
- Grau da Curva (G): ângulo central correspondente a uma corda de comprimento C;
- Afastamento (E): distância entre PI e o ponto médio do arco de circunferência;

- Deflexão (d): ângulo formado pela tangente T e corda de comprimento C que parta do ponto PC.

Esses elementos possuem relações trigonométricas indispensáveis tanto no projeto quanto na locação de estradas, a saber:

$$T = R \cdot \tan \frac{\Delta}{2} \quad (2.1)$$

$$\cos \frac{\Delta}{2} = \frac{R}{R + E} \quad (2.2)$$

$$AC = \Delta = \frac{D}{R} \cdot \frac{180^\circ}{\pi} \quad (2.3)$$

$$E = T \cdot \tan \frac{\Delta}{4} \quad (2.4)$$

2.1.2 Raio Mínimo de Curvatura Horizontal

O raio mínimo de curvatura horizontal é definido como o menor raio de curva para que essa possa ser percorrida em condições limite com a velocidade diretriz e à taxa máxima de superelevação admissível, em condições aceitáveis de segurança e de conforto de viagem. Ao percorrer uma trajetória circular em velocidade constante, um veículo tende naturalmente a sair da mesma em trajetória retilínea tangente à curva a cada ponto. Essa tendência é compensada tanto pela componente do peso do veículo devido à superelevação da curva quanto pelo atrito lateral entre os pneus e a superfície do pavimento. A Figura 2.2 ilustra a dinâmica simplificada do veículo na situação exposta.

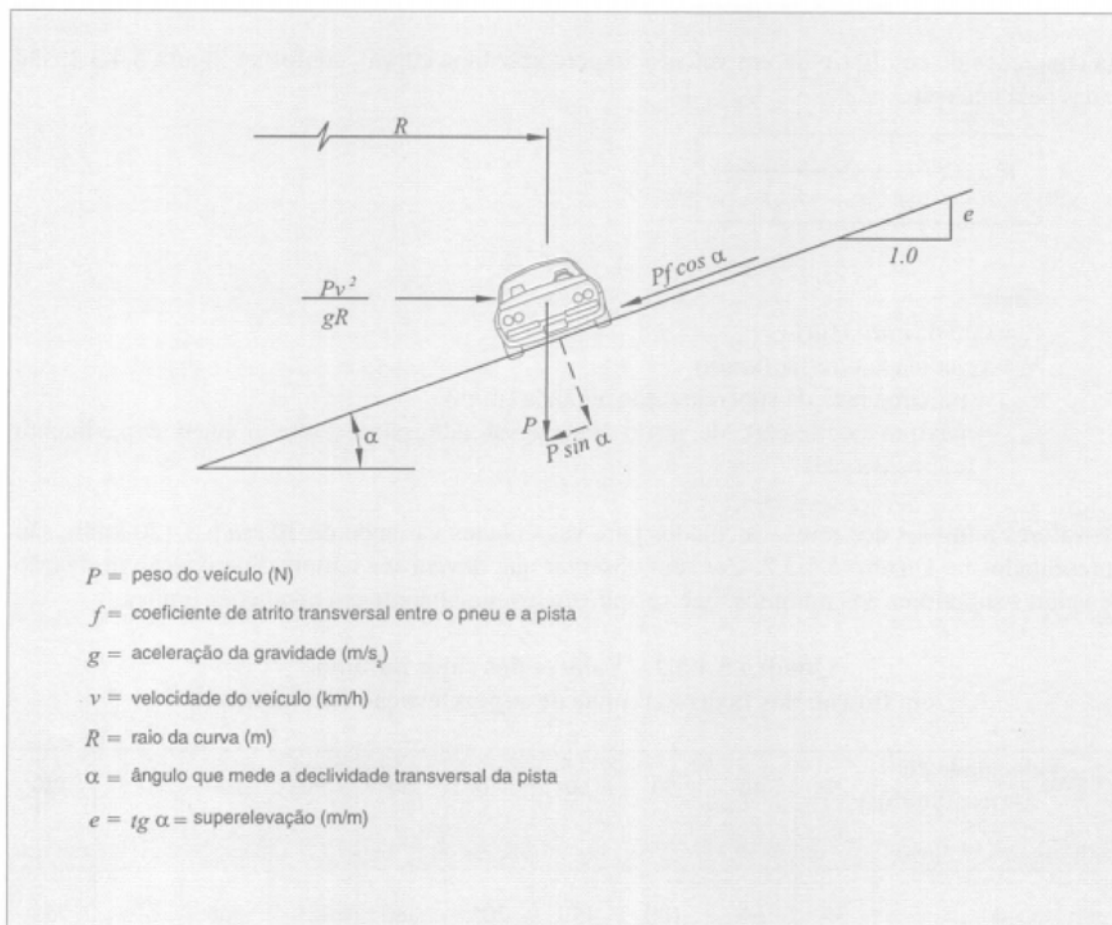


FIGURA 2.2 – Esquema de forças de um veículo em curva. (DNER, 1999)

Para o cálculo de raio mínimo de curvatura horizontal, a Equação 2.5, resultante do equilíbrio de forças no veículo, apresenta o tal raio em função da velocidade do veículo, da superelevação e do correspondente coeficiente de atrito transversal. Adotados simultaneamente os valores máximos admissíveis para a superelevação e para o coeficiente de atrito transversal, calcula-se o raio mínimo admissível, para uma dada velocidade.

$$R_{min} = \frac{V^2}{127 \cdot (e_{max} + f_{max})} \quad (2.5)$$

Os valores máximos admissíveis geralmente adotados em projetos rodoviários para o coeficiente de atrito transversal, segundo o DNER (DNER, 1999), são descritos na Figura 2.3.

Velocidade diretriz (km/h)	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
Coefficiente de atrito transversal $f_{\max}$	0,20	0,18	0,16	0,15	0,15	0,14	0,14	0,13	0,12	0,11

FIGURA 2.3 – Valores máximos admissíveis para os coeficientes de atrito transversal. (DNER, 1999)

Os valores máximos admissíveis para a superelevação podem ser obtidos a partir da Figura 2.4

$e_{\max}$	CASOS DE EMPREGO
12%	Máximo absoluto em circunstâncias específicas.
10 %	Máximo normal. Adequado para fluxo ininterrupto. Adotar para rodovias Classe 0 e Classe I em regiões planas e onduladas.
8%	Valor superior normal. Adotar para rodovias Classe I em regiões montanhosas e rodovias das demais classes de projeto.
6%	Valor inferior normal. Adotar para projetos em áreas urbanizadas ou em 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.

FIGURA 2.4 – Valores máximos admissíveis para os coeficientes de atrito transversal. (PONTES FILHO, 1998)

2.1.3 Curvas Horizontais de Transição

Um veículo, ao passar de uma trajetória retilínea para uma trajetória circular simples, instantaneamente submete seus passageiros a uma força centrífuga em seu próprio referencial. Essa variação brusca de aceleração centrífuga interfere significativamente no conforto e na segurança dos passageiros, sendo, portanto, indesejável. Para contornar esse problema, utilizam-se curvas de transição entre a tangente e a curva circular simples, na qual o raio de curvatura passe suavemente do valor infinito ao valor do raio da curva circular. Segundo Pontes Filho (PONTES FILHO, 1998), de todas as curvas com esse tipo de comportamento, a mais amplamente utilizada é a espiral de Cornu ou clotóide, onde o raio instantâneo de curvatura é inversamente proporcional ao desenvolvimento da curva.

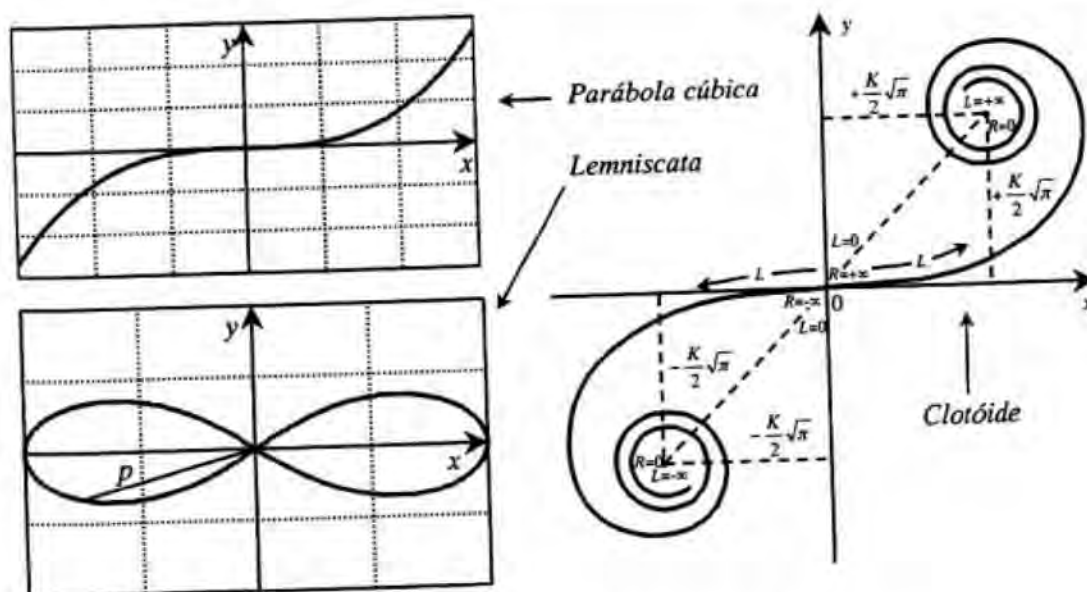


FIGURA 2.5 – Clotóide. (PONTES FILHO, 1998)

Para cada um dos pontos de uma clotóide, o produto do raio de curvatura R pelo seu comprimento desde a origem L , é igual a uma constante K^2 . A magnitude K é chamada parâmetro da clotóide. Para fins de projetos rodoviários convencionais, o DNER (DNER, 1999) recomenda o critério associado à velocidade diretriz para orientar o estabelecimento do limite de emprego de curvas de transição. Segundo esse critério, permite-se a dispensa do uso da curva de transição quando a aceleração centrífuga a que se submetem os passageiros do veículo for igual ou inferior a $0,4\text{m/s}^2$. Alguns valores-limite são apresentados na Figura 2.6.

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

FIGURA 2.6 – Valores-limite dos raios R acima dos quais podem ser dispensadas curvas de transição. (DNER, 1999)

Os principais elementos geométricos da curva de transição são apresentados na Figura 2.7 e definidos a seguir.

- L_s = comprimento do trecho de transição
- E = distância do PI à curva circular

Da mesma forma que as curvas circulares simples, os elementos das curvas de transição possuem relações trigonométricas, a saber:

$$R \cdot L = K^2 = R_c \cdot L_s \quad (2.6)$$

$$\theta = \frac{L^2}{2 \cdot R_c \cdot L_s} \quad (2.7)$$

$$\theta_s = \frac{L_s}{2 \cdot R_c} \quad (2.8)$$

$$D = R_c \cdot \phi \quad (2.9)$$

$$D = \frac{R_c \cdot \phi^\circ \cdot \pi}{180^\circ} \quad (2.10)$$

2.1.4 Comprimento Mínimo de Transição

Mesmo utilizando uma curva de transição para minimizar o efeito de uma variação brusca de força centrífuga, seu comprimento deve ser adequado para que seja percebido, de fato, um aumento gradual dessa força. A partir da constante J , que mede a solicitação radial ou reação transversal que experimentam os passageiros dos veículos devido à variação da força centrífuga, e cujo valor máximo recomendado pelo DNER é de $0,6\text{m/s}^3$, pode-se chegar na expressão de comprimento mínimo do trecho de transição, em metros:

$$L_{s_{min}} = \frac{v^3}{J_{max} \cdot R_c} \quad (2.11)$$

$$L_{s_{min}} = \frac{\left(\frac{V}{3,6}\right)^3}{0,6 \cdot R_c} \quad (2.12)$$

$$L_{s_{min}} = 0,036 \cdot \frac{V^3}{R_c} \quad (2.13)$$

2.1.5 Comprimento Máximo de Transição

O comprimento máximo de transição corresponde ao valor nulo de desenvolvimento do trecho circular, o que leva as curvas espirais a se encontrarem. Assim:

$$\phi = \Delta - 2 \cdot \theta_s = 0 \quad (2.14)$$

$$\Delta = 2 \cdot \theta_s = 2 \cdot \frac{Ls_{max}}{2 \cdot R_c} \quad (2.15)$$

$$Ls_{max} = R_c \cdot \Delta \quad (2.16)$$

$$Ls_{max} = R_c \cdot \Delta^\circ \cdot \frac{\pi}{180^\circ} \quad (2.17)$$

2.2 Classificação Técnica de Rodovias

2.2.1 Classe de Projeto

As classes de projeto traduzem conjuntos de condições técnicas de uma rodovia a partir de um consenso formado no Brasil resultante da experiência acumulada durante o processo de desenvolvimento da sua malha rodoviária. A função exercida pela rodovia e os volumes de tráfego, aliados ao grau de dificuldade de implantação resultante da natureza do terreno atravessado, foram os principais fatores no processo de formulação das classes adotadas atualmente (DNER, 1999).

As classes de projeto recomendadas encontram-se resumidas na Figura 2.8.

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

FIGURA 2.8 – Classes de projeto (Áreas Rurais). (PONTES FILHO, 1998)

2.2.2 Classificação de Relevô - AASHTO

O relevô de um terreno possui significativa influência no alinhamento da rodovia que o corta. A fim de caracterizar variações desse relevô, a AASHTO apresenta uma classificação, utilizada também pelo DNIT, com três tipos (AASHTO, 2004).

- Relevô Plano: distâncias de visibilidade da rodovia, permitidas por sua geometria, são geralmente longas ou podem o ser sem que, para isso, se tenha que incorrer em maiores dificuldades construtivas ou em custos mais elevados;
- Relevô Ondulado: a declividade natural do terreno exige operações constantes de corte e aterro para a conformação do perfil da rodovia, e ocasionais inclinações mais acentuadas oferecem alguma restrição ao desenvolvimento dos alinhamentos horizontais e verticais; e
- Relevô Montanhoso: mudanças abruptas de elevação entre o terreno natural e a plataforma da rodovia, longitudinal e transversalmente, demandam operações de corte e aterro frequentes nas encostas para se alcançar alinhamento horizontal e vertical aceitáveis.

Importante frisar que essa classificação de relevô, no entanto, busca identificar apenas

as características gerais do corredor específico da rodovia. Estradas em regiões montanhosas, por exemplo, cujos corredores possuam todas as características de Relevo Plano, devem ser assim classificadas, e não como Relevo Montanhoso.

2.2.3 Velocidade Diretriz

Velocidade diretriz, ou de projeto, representa a maior velocidade com que pode ser percorrido um trecho viário cuja superfície de rolamento apresenta características normais de rugosidade e ondulações, com segurança e em condições aceitáveis de conforto, mesmo com o pavimento molhado, quando o veículo estiver submetido apenas às limitações impostas pelas características geométricas, sem influência do tráfego (DNER, 1999).

A velocidade diretriz adotada deve respeitar o relevo do terreno e prever sua velocidade de operação, o uso do solo adjacente e a classificação funcional da via. Deve-se buscar, tanto quanto possível, a máxima velocidade diretriz de uma rodovia desde que esta atenda condições recomendáveis de segurança, mobilidade e eficiência; e respeite limites de impacto ambiental, econômico, estético, social e político (AASHTO, 2004).

Uma vez estabelecida a classe de projeto, e definida a velocidade diretriz, em função do relevo da região (ou, mais apropriadamente, do corredor) por onde passa a rodovia, esta velocidade passa a condicionar, direta ou indiretamente, a fixação dos limites a serem observados pelas demais características técnicas com as quais a rodovia será geometricamente projetada (LEE, 2005).

Classe de projeto	Velocidades diretrizes para projeto (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

FIGURA 2.9 – Velocidades diretrizes. (DNER, 1999)

2.3 Recomendações de Alinhamento Horizontal

O Manual de Projeto Geométrico de Rodovias Rurais do DNIT apresenta toda a informação necessária para que projetos geométricos de rodovias rurais sejam executados em conformidade com as normas vigentes no Brasil. Além disso, esse Manual acrescenta sugestões e orientações técnicas preliminares sobre aspectos não abrangidos ou delimitados por essas normas (DNER, 1999).

Segundo Pontes Filho (PONTES FILHO, 1998), o alinhamento horizontal de uma estrada é composto basicamente de trechos retos concordados por curvas, e deverá ser coerente com a topografia da região. Para rodovias de elevado padrão, o traçado deverá ser antes uma sequência de poucas curvas de raios amplos do que longas tangentes quebradas por curvas de pequeno desenvolvimento circular.

Essa orientação principal corresponde ao conceito atual de projeto geométrico de rodovias rurais, em contraposição ao método tradicional mencionado no manual brasileiro, e também por ele considerado inadequado, de "serem fixadas tangentes longas como unidades básicas de projeto, concordadas com arcos de circunferência de raio pequeno." O DNIT afirma que a tangente longa deve ser evitada por ser monótona, já que inteiramente previsível, e perigosa por oferecer extensão estática que convida ao excesso de velocidade, levando o motorista cansado ao sono e favorecendo o ofuscamento à noite (DNER, 1999).

No mesmo sentido, a AASHTO afirma que um traçado contínuo que se ajusta aos contornos do ambiente é preferível a longas tangentes cortando o terreno. Dessa forma, operações de corte de taludes, e conseqüentemente de sua vegetação, que se estendem acima do nível da rodovia podem ser evitadas e a configuração do meio ambiente pode ser preservada (AASHTO, 2004).

As Figuras 2.10 e 2.11, retiradas do Manual do DNIT, ilustram as diferenças entre o conceito atual e o método tradicional de projeto de traçado de rodovias.

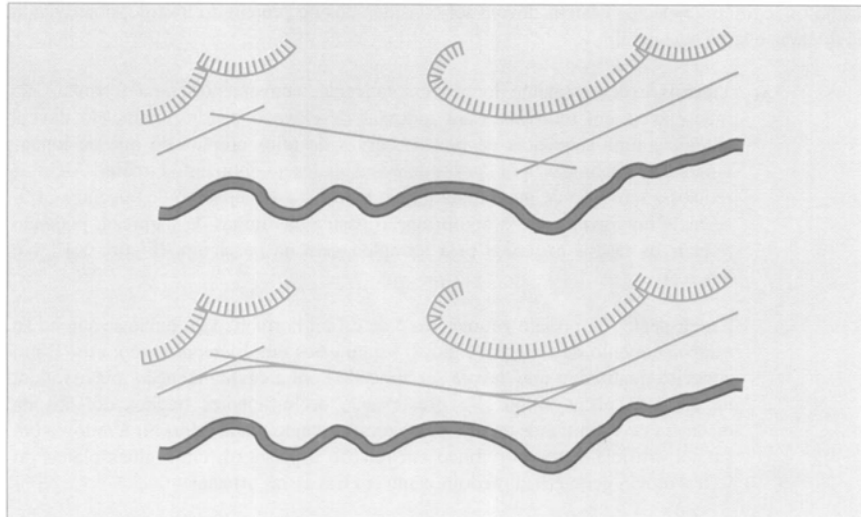


FIGURA 2.10 – Tangentes longas concordadas com curvas de raio pequeno. (DNER, 1999)

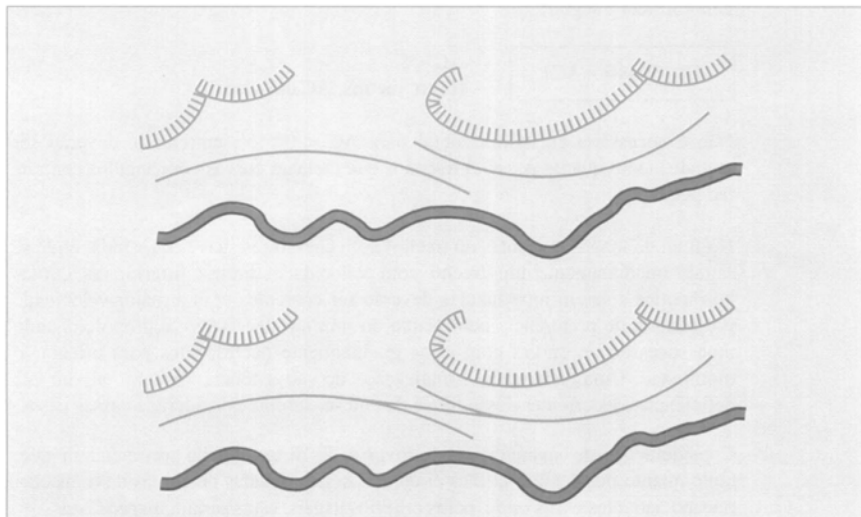


FIGURA 2.11 – Curvas de raio longo concordadas com tangentes curtas. (DNER, 1999)

Concomitantemente, elencam-se a seguir as principais recomendações do DNIT relativas ao alinhamento horizontal de rodovias, que devem ser consideradas visando adequabilidade às normas e a boas práticas de projeto.

- Como já discutida anteriormente a necessidade de se evitar tangentes longas, Pontes Filho apresenta um critério objetivo que pode ser usado para limitar sua extensão. O limite T é calculado pelo percurso de 1,5 minutos percorridos à velocidade diretriz V , ou seja:

$$T_{max} = 25 \cdot V, \quad (2.18)$$

com T em metros e V em km/h.

- No caso de curvas com ângulos centrais AC muito pequenos (iguais ou inferiores a 5 graus), os raios deverão ser suficientemente grandes de forma a proporcionar desenvolvimentos circulares mínimos D com intuito de se evitar a aparência de quebra de alinhamento. Tal condição é obtida a partir da fórmula:

$$D_{min} = 30 \cdot (10 - AC), \quad (2.19)$$

com D em metros e AC em graus.

- Recomenda-se, tanto quanto possível, a aplicação de curvas de transição entre o trecho tangente e a curva circular mesmo nos casos onde elas seriam dispensáveis pelos critérios usuais.
- O manual brasileiro afirma também ser indesejável a existência de duas curvas sucessivas no mesmo sentido separadas por um curto trecho em tangente. Segundo Pontes Filho (PONTES FILHO, 1998), isso se justifica devido a maioria dos motoristas não esperar a existência de uma segunda curva no mesmo sentido logo em seguida. Em contrapartida, é preferível substituí-las por uma única curva longa ou, pelo menos, substituir a tangente por um arco circular, tendo o cuidado de se evitar grande diferença de curvatura entre os raios. Sendo impossível tais substituições, o Manual apresenta uma expressão para a extensão mínima T da tangente intermediária que reduz o problema, correspondente ao percurso de aproximadamente 15 segundos percorrido à velocidade diretriz V:

$$T_{min} = 4 \cdot V, \quad (2.20)$$

com T em metros e V em km/h.

- Por outro lado, curvas sucessivas em sentidos opostos, quando dotadas de curvas de transição, podem ter suas extremidades coincidentes ou separadas por um curto trecho em tangente. Porém, caso não possuam trechos em espiral, o comprimento mínimo da tangente intermediária deve permitir a transição de superelevação em qualquer hipótese.
- Ainda, é desejável que curvas sucessivas procurem manter um inter-relacionamento, a fim de evitar variações bruscas de curvaturas que possam surpreender o motorista. O Manual do DNIT apresenta a Figura 2.12 como uma orientação para a escolha dos raios de curvas sucessivas.

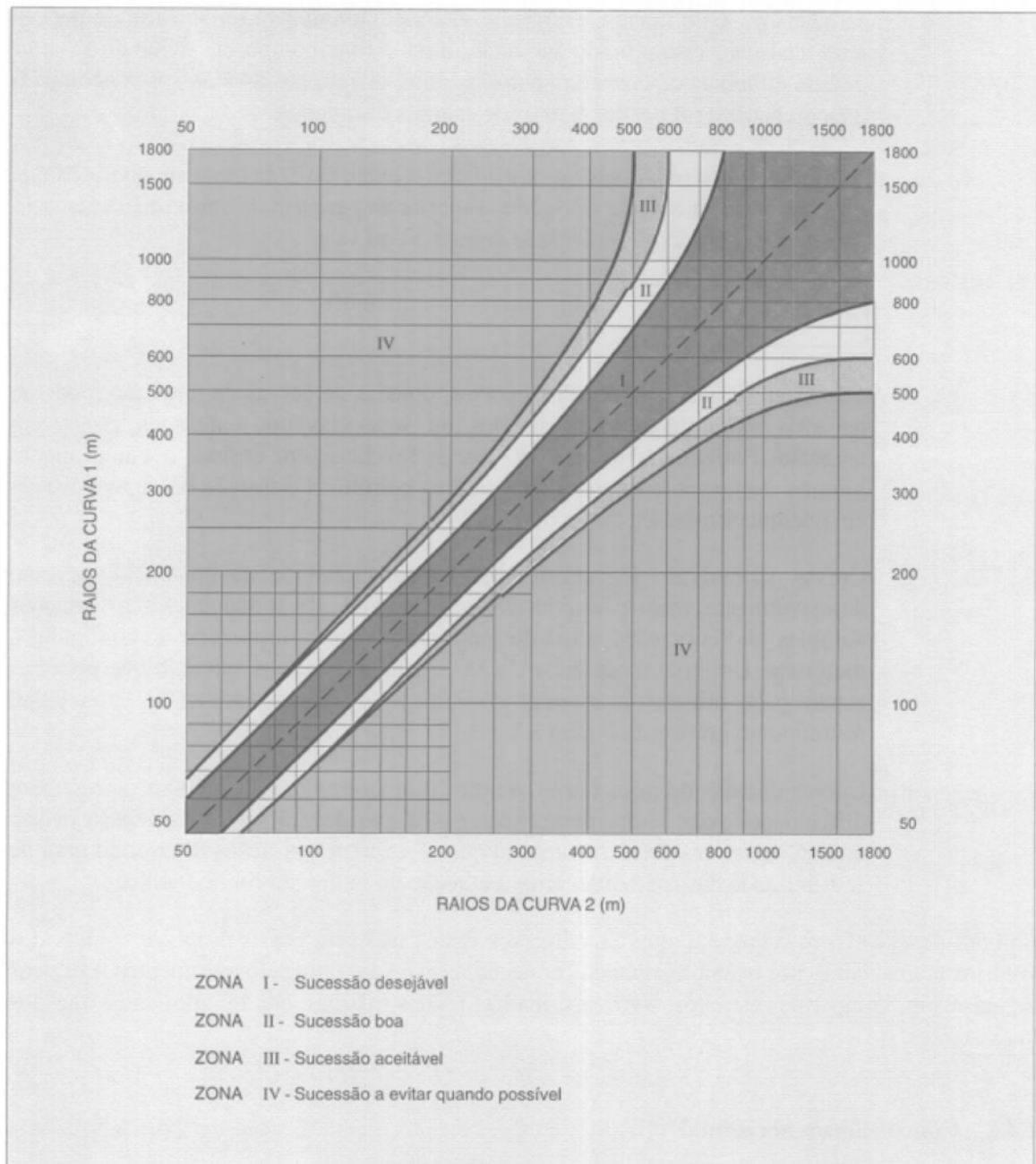


FIGURA 2.12 – Critérios para orientar a escolha dos raios de curvas sucessivas. (DNER, 1999)

- Por fim, o Manual recomenda que se evite curvas de raios superiores a 5.000 metros, pois apresentam dificuldades para serem percorridas dado sua pequena deflexão unitária ser inferior ao grau de sensibilidade das rodas dianteiras à atuação do motorista sobre o volante.

3 Abordagem Metodológica

3.1 Obtenção de Imagens

Primeiramente, por meio do software Google Earth Pro 7.1.2.2041, que constrói um modelo tridimensional do globo terrestre a partir de um mosaico de 28 imagens de satélite e aéreas, exportou-se imagens que compõem as duas rodovias objetos de análise do presente trabalho, Rodovia Presidente Dutra e sistema Ayrton Senna-Carvalho Pinto, ao longo dos trechos entre suas intersecções na região metropolitana de São Paulo e na cidade de Taubaté-SP.

Cada imagem foi obtida com a maior resolução possível disponibilizada pelo software, o que justifica sua utilização em detrimento da sua versão gratuita, a fim de se alcançar melhor precisão no posterior desenho dos traçados das rodovias.

Em seguida, tais imagens foram importadas pelo software Bentley PowerCivil for Brazil V8i (SELECTseries 4) e devidamente georreferenciadas no sistema de coordenadas geográficas UTM, datum WGS 1984, zona 23 sul. Finalmente, conjugando essas imagens, desenvolveu-se um mosaico próprio que descreve todo o percurso de ambas as rodovias entre os pontos supracitados.



FIGURA 3.1 – Mosaico das rodovias.

3.2 Desenho de Traçado

A partir do mosaico de imagens das rodovias, o primeiro passo para o desenho dos traçados das rodovias foi identificar as retas tangentes que as compunham e prolongá-las até se interseccionarem, obtendo-se assim os pontos de intersecção (PI) das curvas.

Após isso, através da ferramenta Complex by PI do PowerCivil, determinou-se um padrão inicial de curva de transição simétrica, com raio de 800 metros e comprimentos de transição de 50 metros, para desenhar cada traçado. Tais parâmetros iniciais foram admitidos assim somente para que não assumissem valor nulo e pudessem posteriormente serem alterados com os pontos de intersecção fixados.

Por fim, editou-se reiteradamente cada valor de raio e comprimento de transição, preservando a simetria, de modo a se encontrar os valores que melhor ajustassem o desenho do traçado a cada curva das rodovias. Importante, no entanto, esclarecer que, apesar das tentativas de se identificar os comprimentos de transição das curvas, não foi possível determinar tais valores com precisão significativa a ponto de se realizar uma análise crítica útil posteriormente. Por tal motivo, decidiu-se adotar tais comprimentos nulos, haja vista sua edição praticamente não implicar necessidade de modificação do valor do raio de curva.

3.3 Limitantes de Alinhamento Horizontal

Com os traçados desenhados e respectivos parâmetros de curvas propriamente ajustados, foram gerados e exportados os dois relatórios de alinhamento horizontal, com todos os elementos geométricos das duas rodovias em análise.

Em posse desses dados, cada tangente e cada curva circular foi comparada a valores máximos e mínimos descritos nas recomendações de alinhamento horizontal do DNIT na Seção 2.2. A velocidade diretriz, necessária para o cálculo de limites em algumas das recomendações, foi obtida a partir da Classe de Projeto I-A e do Relevo Plano, classificações essas comuns a ambas as rodovias, que resultaram no valor de 100 km/h.

Finalmente, identificaram-se as inconformidades de cada traçado com as recomendações atuais de projeto e as divergências dos projetos de traçado das rodovias entre si por terem sido projetadas em épocas diferentes e, portanto, com orientações distintas.

3.4 Observação sobre Alinhamento Vertical

Como o estudo se propõe a analisar as rodovias por meio de imagens de satélite, percebem-se daí limitações à análise, haja vista do meio utilizado não ser possível extrair

parâmetros de alinhamento vertical. Portanto, restringiu-se o escopo do trabalho à análise dos parâmetros de alinhamento horizontal somente.

4 Análise Crítica de Resultados

4.1 Resultados

A fim de padronizar a identificação das retas tangentes e curvas circulares das rodovias em análise, numerou-se em cada rodovia essas retas e curvas no sentido Taubaté-São Paulo.

4.1.1 Recomendação 1 - Tangentes Longas

Conforme a recomendação do DNIT para o comprimento máximo de tangente, calculou-se:

$$T_{max} = 25 \cdot V = 25 \cdot 100 = 2500m \quad (4.1)$$

Dado esse limite, observaram-se oito tangentes irregulares na Via Dutra e apenas uma na Ayrton Senna/Carvalho Pinto. No entanto, é importante apontar que a tangente 62 desta rodovia, que supera o limite com extensão de 2500,53m, não pode ser considerada irregular frente a esse limite, haja vista o método empregado de desenho do traçado e a resolução das imagens utilizadas não assegurarem tamanha precisão.

TABELA 4.1 – Tangentes longas da Rodovia Presidente Dutra.

Tangente	Estaca Início	Estaca Fim	Comprimento (m)
5	4+182.1855	10+073.8977	5891,71
6	10+493.0881	30+155.1169	19662,03
7	30+739.7996	37+419.8443	6680,04
8	37+881.2103	47+360.5931	9479,38
17	59+858.7333	65+328.2225	5469,49
37	86+772.6653	90+617.3962	3844,73
38	91+576.5093	100+724.1933	9147,68
41	104+679.4411	108+157.4483	3478,01

4.1.2 Recomendação 2 - Ângulos Centrais Muito Pequenos

Ângulos centrais iguais ou inferiores a 5 graus devem ser justificados por um desenvolvimento mínimo calculado pela Equação 2.19 para se evitar aparência de quebra de alinhamento. Enquanto a rodovia Ayrton Senna/Carvalho Pinto não apresentou nenhuma curva que necessitasse a imposição desse limite, a Rodovia Presidente Dutra possui nove curvas com ângulos centrais iguais ou inferiores a 5 graus, das quais apenas duas (curvas 38 e 39) garantiram o desenvolvimento mínimo.

TABELA 4.2 – Desenvolvimentos mínimos das curvas da Rodovia Presidente Dutra.

Curva	Desenvolvimento (m)	Ângulo Central (°)	Desen. Mín (m)
1	81,92	4,7	159,18
2	48,93	2,8	215,89
3	12,60	0,1	297,83
8	18,49	1,1	268,22
36	83,78	4,8	156,00
38	345,88	2,8	215,07
39	381,52	3,1	206,32
41	42,29	2,4	227,30
43	86,71	5,0	150,95

4.1.3 Recomendação 3 - Curvas de Transição

Como já mencionado na Seção 3.2, após reiteradas tentativas de se identificar os comprimentos de transição das curvas, não foi possível determinar tais valores com precisão significativa a ponto de se realizar uma análise crítica útil posteriormente. Por isso, decidiu-se adotar tais comprimentos nulos, haja vista sua edição praticamente não implicar necessidade de modificação do valor do raio de curva.

4.1.4 Recomendação 4 - Curvas Sucessivas de Mesmo Sentido

Devido a este ser um trabalho de análise, não de projeto, buscou-se observar se, dadas duas curvas sucessivas de mesmo sentido, elas estariam de acordo com a recomendação de tangente intermediária mínima, já que neste caso não é possível alterar o traçado. Tal tangente é calculada da seguinte forma:

$$T_{min} = 4 \cdot V = 4 \cdot 100 = 400m \quad (4.2)$$

Com esse limite, percebeu-se que, apesar de ocorrerem curvas sucessivas de mesmo sentido nove vezes na Dutra, em todas elas foi respeitado o comprimento de tangente intermediária mínima, sendo a menor tangente com 704 metros. Por outro lado, na Rodovia Ayrton Senna/Carvalho Pinto, ocorreram curvas sucessivas de mesmo sentido 14 vezes, das quais duas tangentes intermediárias não satisfizeram nem metade da extensão mínima.

TABELA 4.3 – Comprimentos de tangentes intermediárias da Rodovia Presidente Dutra.

Curva	Sentido (E/D)	Tangente	Comp. Tg. Intermed. (m)
17	D	18	1.237,46
18	D		
19	E	20	704,18
20	E		
23	D	24	1.243,39
24	D		
32	D	33	1.069,57
33	D		
36	E	37	3.844,73
37	E		
38	D	39	1.848,22
39	D		
40	E	41	3.478,01
41	E		
41	E	42	2.043,68
42	E		
42	E	43	2.373,50
43	E		

TABELA 4.4 – Comprimentos de tangentes intermediárias da Rodovia Ayrton Senna / Carvalho Pinto.

Curva	Sentido (E/D)	Tangente	Comp. Tg. Intermed. (m)
10	E	11	69,03
11	E		
17	E	18	1386,86
18	E		
20	E	21	1929,97
21	E		
22	D	23	1274,58

TABELA 4.4 – Comprimentos de tangentes intermediárias da Rodovia Ayrton Senna / Carvalho Pinto.

Curva	Sentido (E/D)	Tangente	Comp. Tg. Intermed. (m)
23	D		
26	E	27	1381,21
27	E		
46	D	47	920,62
47	D		
47	D	48	1213,57
48	D		
50	D	51	773,45
51	D		
52	E	53	714,10
53	E		
56	D	57	1852,22
57	D		
63	D	64	2450,85
64	D		
67	E	68	2085,33
68	E		
75	D	76	1386,16
76	D		
85	E	86	157,49
86	E		

4.1.5 Recomendação 5 - Curvas Sucessivas de Sentidos Opostos

Assim como explanado em 4.1.3, os limites de extração de dados das rodovias por meio de imagens de satélite para a produção deste trabalho não permitem que se avalie também esta recomendação, haja vista a necessidade de parâmetros de trechos de curva de transição e, ainda, de parâmetros de alinhamento vertical, como a superelevação.

4.1.6 Recomendação 6 - Inter-relacionamento de Curvas Sucessivas

O inter-relacionamento de curvas sucessivas é desejável para se evitar situações imprevisíveis ao motorista. A partir da Figura 2.12 disponibilizada pelo DNIT, realizou-se

a classificação de cada par de curvas sucessivas por meio de uma sobreposição a essa figura de uma plotagem de pontos (raio i , raio $i+1$) com o mesmo sistema de coordenadas logarítmico de base 2.

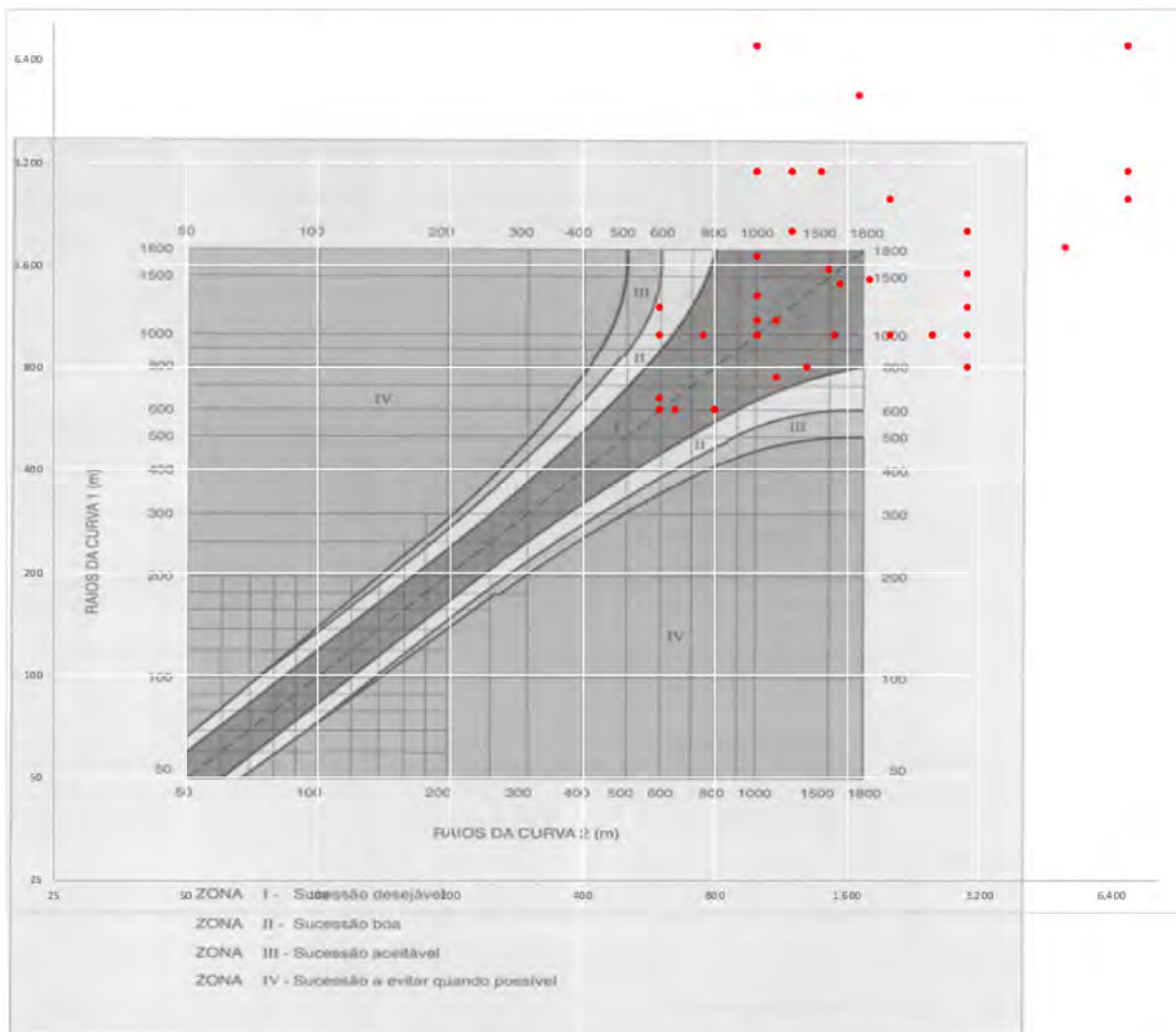


FIGURA 4.1 – Sobreposição de gráficos para classificação de inter-relacionamento de curvas sucessivas da Rodovia Presidente Dutra.

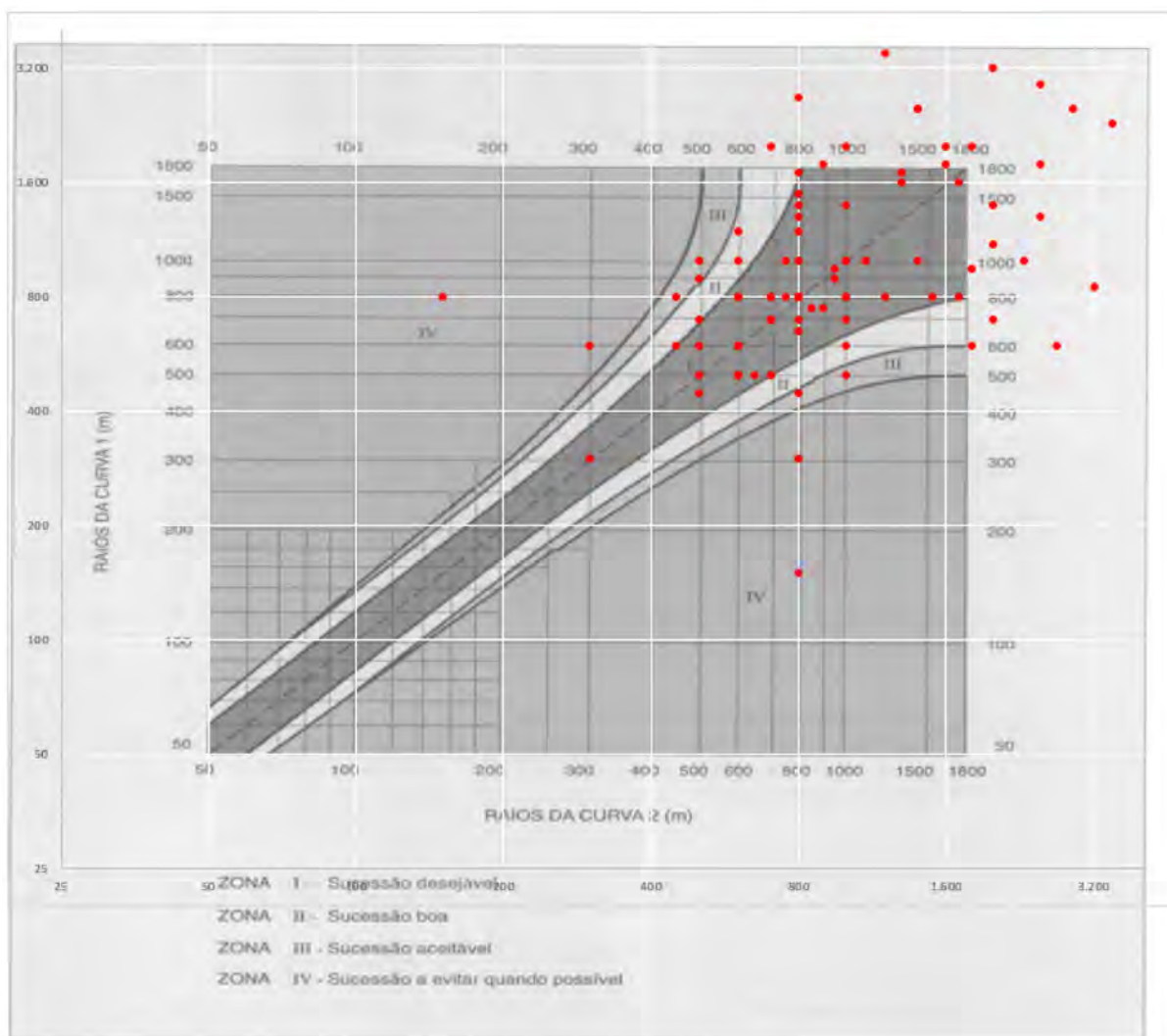


FIGURA 4.2 – Sobreposição de gráficos para classificação de inter-relacionamento de curvas sucessivas da Rodovia Ayrton Senna / Carvalho Pinto.

Com isso, enquanto a Rodovia Presidente Dutra apresentou apenas sucessões classificadas como desejáveis (Zona I) e boas (Zona II), o Ayrton Senna/Carvalho Pinto apresentou cinco sucessões classificadas como aceitáveis (Zona III) e quatro "a evitar quando possível" (Zona IV).

TABELA 4.5 – Classificação de inter-relacionamento de curvas sucessivas da Rodovia Ayrton Senna / Carvalho Pinto.

Curva	Raio (m)	Raio Curva Seguinte (m)	Zona
5	450	800	III
6	800	150	IV
7	150	800	IV
29	500	1.000	III
30	1.000	500	III

TABELA 4.5 – Classificação de inter-relacionamento de curvas sucessivas da Rodovia Ayrton Senna / Carvalho Pinto.

Curva	Raio (m)	Raio Curva Seguinte (m)	Zona
31	500	900	III
53	800	300	IV
55	300	600	IV
86	800	450	III

Importante observar que, devido ao gráfico do DNIT ser simétrico, não há necessidade de se comparar o raio de uma curva com a da curva anterior, pois isso já está sendo feito automaticamente. Além disso, como a área do gráfico do DNIT não abrange todos os pontos plotados, foi necessário extrapolar as curvas-fronteira das zonas para a se realizar a classificação.

4.1.7 Recomendação 7 - Raios Muito Grandes

De acordo com o Manual do DNIT (DNER, 1999), é interessante evitar raios muito grandes, acima de 5000 metros. Dado isso, percebeu-se total conformidade da Rodovia Ayrton Senna/Carvalho Pinto com essa recomendação, com seu maior raio no trecho Taubaté-São Paulo de 3500m. Por outro lado, na Rodovia Presidente Dutra, se observou quatro curvas que ultrapassavam tal limite e uma que se igualava a ele.

TABELA 4.6 – Raios muito grandes da Rodovia Presidente Dutra.

Curva	Raio (m)
4	7.000
10	5.000
37	7.000
38	7.000
39	7.000

TABELA 4.7 – Maiores raios de curva da Rodovia Ayrton Senna / Carvalho Pinto.

Curva	Raio (m)
14	2.500
15	2.900
16	2.500
22	2.500
58	3.500

TABELA 4.7 – Maiores raios de curva da Rodovia Ayrton Senna / Carvalho Pinto.

Curva	Raio (m)
70	3.200
79	2.700

4.2 Discussões

Percebe-se serem coerentes os resultados obtidos com o que era esperado, ou seja, a Rodovia Presidente Dutra de fato possui uma quantidade maior de não conformidades com as recomendações atuais de projeto se comparada com o sistema Ayrton Senna / Carvalho Pinto, dado aquela possuir projeto mais antigo que este.

Importante acrescentar, ainda, que tais não conformidades encontradas afetam a segurança e o conforto de inúmeros usuários de ambas as rodovias. Longos trechos retos seguidos de curvas muito acentuadas, por exemplo, ou curvas de raios excessivos são elementos contra-intuitivos e imprevisíveis ao motorista, interferindo em sua dirigibilidade e aumentando os riscos de ocorrência de acidentes.

No entanto, esses riscos podem e devem ser mitigados com a implantação de sinalizações horizontal, vertical e luminosa nas vias. Um exemplo de sinalização horizontal utilizada para avisar aos motoristas que uma curva acentuada se aproxima são os sonorizadores, ilustrados no Figura 4.3. Essa sinalização corresponde à aplicação de uma textura sobre a pista de rolamento em faixas espaçadas em distâncias decrescentes umas das outras à medida que se aproximam do ponto de início da curva nos dois sentidos. Tal textura, com o contato dos pneus do veículo que por ela transita, implica em sinais sonoro ao motorista que, com o decrescer das distâncias entre as faixas texturizadas, soam como uma "contagem regressiva" para a chegada da curva.



FIGURA 4.3 – Sonorizador.

5 Comentários Finais

Este trabalho buscou realizar um estudo comparativo entre os traçados da Rodovia Presidente Dutra e do Corredor Ayrton Senna/Carvalho Pinto entre as cidades de São Paulo-SP e Taubaté-SP, dado a relevância dessas vias para o transporte rodoviário brasileiro ao atravessarem uma das regiões mais ricas e industrializadas do País, o Vale do Paraíba.

Apresentou-se uma modelagem de ambos os traçados, do qual resultou dois relatórios de alinhamento horizontal, permitindo a aquisição de parâmetros para se realizar a devida análise crítica das vias com base nas recomendações concordantes provenientes tanto do órgão brasileiro DNIT, quanto da associação americana AASHTO.

É importante acrescentar que essa análise não é exaustiva, haja vista não só a restrição de informações sobre as rodovias, mas também da precisão do desenho dos traçados e da resolução das imagens de satélite.

Almejou-se neste trabalho apresentar as diferenças de conceito de projeto dos traçados rodoviários com o estudo de rodovias projetadas em épocas diferentes. Viu-se a partir disso uma preocupação crescente da segurança e do conforto do usuários, em detrimento da economia de recursos.

Para estudos futuros, sugere-se realizar um estudo crítico a respeito do alinhamento vertical dessas rodovias por meio de inclinômetros instalados em um veículo que percorra o referido trajeto. Em seguida, ainda poderia se conjugar os parâmetros de alinhamento vertical mensurados por esses inclinômetros com os de alinhamento horizontal já obtidos neste trabalho para uma análise completa tridimensional de modelos das rodovias em estudo.

Além disso, pode-se propor também uma análise crítica similar a realizada neste trabalho no trecho da Rodovia Presidente Dutra de Taubaté-SP ao Rio de Janeiro-RJ, por ser complementar ao trecho estudado dessa rodovia. Ou ainda, por fim, realizar uma comparação entre traçados das vias de subida e descida em trechos de serra, como na região da Serra das Araras, na Rodovia Washington Luís, no Sistema Anchieta / Imigrantes e na Rodovia dos Tamoios.

Referências

AASHTO. **A Policy on Geometric Design of Highways and Streets, 2004.** [S.l.]: AASHTO, 2004.

DNER. **Manual de projeto geométrico de rodovias rurais.** Rio de Janeiro: IPR Publicações, 1999.

LEE, S. H. **Introdução ao projeto geométrico de rodovias.** Florianópolis: Editora da UFSC, 2005.

PONTES FILHO, G. **Estradas de rodagem: projeto geométrico.** São Carlos: bidim, 1998.

Apêndice A - Parâmetros de Alinhamento Horizontal

A.1 Tangentes

TABELA A.1 – Tangentes da Rodovia Presidente Dutra.

Tangente	Estaca Início	Estaca Fim	Comprimento (m)
1	0+000.0000	0+152.8709	152,87
2	0+234.7941	0+404.0699	169,28
3	0+453.0036	1+759.3471	1306,34
4	1+771.9464	3+124.1827	1352,24
5	4+182.1855	10+073.8977	5891,71
6	10+493.0881	30+155.1169	19662,03
7	30+739.7996	37+419.8443	6680,04
8	37+881.2103	47+360.5931	9479,38
9	47+379.0804	47+988.3674	609,29
10	48+726.2820	49+289.4197	563,14
11	49+984.0177	51+280.2166	1296,20
12	51+856.5469	52+543.8357	687,29
13	53+468.4356	53+847.7300	379,29
14	54+648.0432	55+323.9872	675,94
15	55+738.2728	56+393.7965	655,52
16	57+623.1185	59+123.8550	1500,74
17	59+858.7333	65+328.2225	5469,49
18	65+491.6628	66+729.1201	1237,46
19	67+282.6671	67+621.3696	338,70
20	67+822.3834	68+526.5630	704,18
21	69+037.5029	69+391.6821	354,18
22	69+888.3422	70+401.3168	512,97

TABELA A.1 – Tangentes da Rodovia Presidente Dutra.

Tangente	Estaca Início	Estaca Fim	Comprimento (m)
23	70+963.9320	71+477.2096	513,28
24	71+631.4633	72+874.8503	1243,39
25	73+109.6124	73+219.6723	110,06
26	73+779.3081	74+215.8350	436,53
27	74+644.4302	75+092.8423	448,41
28	75+345.8985	76+130.4230	784,52
29	76+310.8501	78+762.6705	2451,82
30	79+144.4992	79+625.5696	481,07
31	80+023.4101	80+097.0548	73,64
32	80+313.6001	80+558.3645	244,76
33	80+839.0176	81+908.5831	1069,57
34	82+422.7713	83+280.3372	857,57
35	83+994.2049	84+348.4411	354,24
36	85+178.2364	86+688.8897	1510,65
37	86+772.6653	90+617.3962	3844,73
38	91+576.5093	100+724.1933	9147,68
39	101+070.0725	102+918.2937	1848,22
40	103+299.8166	103+967.7981	667,98
41	104+679.4411	108+157.4483	3478,01
42	108+199.7413	110+243.4240	2043,68
43	110+847.6466	113+221.1431	2373,50
44	113+307.8542	114+192.6156	884,76

TABELA A.2 – Tangentes da Rodovia Ayrton Senna / Carvalho Pinto.

Tangente	Estaca Início	Estaca Fim	Comprimento (m)
1	0+000.0000	0+181.9590	181,96
2	0+385.3368	0+638.2432	252,91
3	0+886.9560	1+451.0200	564,06
4	1+680.4503	1+985.5316	305,08
5	2+338.9402	2+500.6906	161,75
6	2+805.9127	2+988.5233	182,61
7	3+301.9926	3+679.8340	377,84
8	3+918.8519	4+370.9728	452,12
9	4+553.9099	5+168.9187	615,01
10	5+274.7602	5+671.2015	396,44

TABELA A.2 – Tangentes da Rodovia Ayrton Senna / Carvalho Pinto.

Tangente	Estaca Início	Estaca Fim	Comprimento (m)
11	5+784.1060	5+853.1323	69,03
12	5+957.6151	6+256.9557	299,34
13	6+367.5456	7+998.3606	1630,82
14	8+971.3494	10+063.4046	1092,06
15	12+369.1947	13+981.0754	1611,88
16	15+835.9795	16+795.5026	959,52
17	17+999.5522	19+258.3584	1258,81
18	19+871.1319	21+257.9888	1386,86
19	21+746.6034	22+593.5589	846,96
20	24+026.6692	25+863.1767	1836,51
21	26+191.3447	28+121.3196	1929,97
22	28+623.8618	29+965.1166	1341,25
23	30+495.0577	31+769.6347	1274,58
24	32+603.9572	34+408.9643	1805,01
25	34+561.1205	35+347.1841	786,06
26	35+753.1617	37+120.5564	1367,39
27	37+479.7706	38+860.9837	1381,21
28	39+073.5818	40+574.4369	1500,86
29	41+112.3308	41+712.5749	600,24
30	42+187.8381	43+503.9023	1316,06
31	44+264.7954	44+553.1744	288,38
32	44+884.5478	46+029.8605	1145,31
33	46+512.2002	47+565.6340	1053,43
34	48+097.3553	48+333.2796	235,92
35	48+988.2889	49+131.8483	143,56
36	49+745.5312	50+176.8132	431,28
37	50+873.6662	51+387.2888	513,62
38	51+714.1753	52+076.5998	362,42
39	52+232.0845	53+577.7995	1345,72
40	53+917.1430	54+061.7101	144,57
41	54+685.4824	54+986.3608	300,88
42	55+266.2581	55+739.3042	473,05
43	55+987.1359	56+291.8489	304,71
44	56+664.2148	57+270.0714	605,86
45	57+923.5517	58+645.8280	722,28

TABELA A.2 – Tangentes da Rodovia Ayrton Senna / Carvalho Pinto.

Tangente	Estaca Início	Estaca Fim	Comprimento (m)
46	59+385.1783	60+698.9334	1313,76
47	60+938.1131	61+858.7377	920,62
48	62+369.5065	63+583.0738	1213,57
49	63+947.7082	64+775.1596	827,45
50	65+203.6235	65+372.4610	168,84
51	65+712.8401	66+486.2926	773,45
52	66+735.4414	66+997.5101	262,07
53	67+492.4082	68+206.5086	714,10
54	68+635.6199	68+835.1382	199,52
55	68+983.6084	69+275.5839	291,98
56	69+467.6108	69+688.6397	221,03
57	69+835.2935	71+687.5124	1852,22
58	72+025.5933	74+142.6232	2117,03
59	75+884.2804	76+612.8031	728,52
60	78+219.2581	78+524.6688	305,41
61	78+979.9783	79+285.0429	305,06
62	79+765.6456	82+266.1790	2500,53
63	82+429.4698	83+404.8858	975,42
64	83+744.9250	86+195.7714	2450,85
65	86+667.1074	87+309.8560	642,75
66	88+279.4990	88+564.1342	284,64
67	89+019.5392	89+472.4148	452,88
68	90+068.6254	92+153.9565	2085,33
69	92+980.5259	95+067.2910	2086,77
70	97+032.8906	97+659.9122	627,02
71	99+473.5761	100+520.0957	1046,52
72	100+956.8188	102+222.3657	1265,55
73	102+439.7719	102+806.9952	367,22
74	102+920.5229	103+620.8648	700,34
75	104+407.7910	104+824.3875	416,60
76	105+822.5908	107+208.7488	1386,16
77	108+712.6283	109+312.5473	599,92
78	109+925.4390	110+408.0791	482,64
79	110+636.3870	111+347.2694	710,88
80	113+557.1010	114+064.2399	507,14

TABELA A.2 – Tangentes da Rodovia Ayrton Senna / Carvalho Pinto.

Tangente	Estaca Início	Estaca Fim	Comprimento (m)
81	114+160.8010	114+546.2671	385,47
82	114+812.0062	115+552.2020	740,20
83	115+654.0535	116+911.1304	1257,08
84	117+381.7618	117+807.6417	425,88
85	118+409.6418	118+627.5261	217,88
86	119+450.4687	119+607.9567	157,49
87	119+929.7596	120+214.4217	284,66
88	121+020.2130	121+216.4416	196,23
89	121+531.2962	121+927.0448	395,75
90	122+283.1971	122+573.5284	290,33
91	122+756.1776	124+235.5779	1479,40

A.2 Curvas

TABELA A.3 – Curvas da Rodovia Presidente Dutra.

Curva	Estaca Início	Estaca Fim	R (m)	D (m)	Δ (°)	Sentido (E/D)
1	0+152.8709	0+234.7941	1.000	81,92	4,7	D
2	0+404.0699	0+453.0036	1.000	48,93	2,8	E
3	1+759.3471	1+771.9464	1.000	12,60	0,1	D
4	3+124.1827	4+182.1855	7.000	1.058,00	8,7	E
5	10+073.8977	10+493.0881	3.000	419,19	8,0	D
6	30+155.1169	30+739.7996	2.000	584,68	16,7	E
7	37+419.8443	37+881.2103	2.500	461,37	10,6	D
8	47+360.5931	47+379.0804	1.000	18,49	1,1	E
9	47+988.3674	48+726.2820	1.700	737,91	24,9	D
10	49+289.4197	49+984.0177	5.000	694,60	8,0	E
11	51+280.2166	51+856.5469	1.800	576,33	18,3	D
12	52+543.8357	53+468.4356	1.450	924,60	36,5	E
13	53+847.7300	54+648.0432	1.550	800,31	29,6	D
14	55+323.9872	55+738.2728	1.400	414,29	17,0	E
15	56+393.7965	57+623.1185	3.000	1.229,32	23,5	D
16	59+123.8550	59+858.7333	1.500	734,88	28,1	E
17	65+328.2225	65+491.6628	1.000	163,44	9,4	D
18	66+729.1201	67+282.6671	1.100	553,55	28,8	D

TABELA A.3 – Curvas da Rodovia Presidente Dutra.

Curva	Estaca Início	Estaca Fim	R (m)	D (m)	Δ (°)	Sentido (E/D)
19	67+621.3696	67+822.3834	1.100	201,01	10,5	E
20	68+526.5630	69+037.5029	750	510,94	39,0	E
21	69+391.6821	69+888.3422	1.000	496,66	28,5	D
22	70+401.3168	70+963.9320	1.300	562,62	24,8	E
23	71+477.2096	71+631.4633	800	154,25	11,0	D
24	72+874.8503	73+109.6124	600	234,76	22,4	D
25	73+219.6723	73+779.3081	650	559,64	49,3	E
26	74+215.8350	74+644.4302	600	428,60	40,9	D
27	75+092.8423	75+345.8985	600	253,06	24,2	E
28	76+130.4230	76+310.8501	1.000	180,43	10,3	D
29	78+762.6705	79+144.4992	3.000	381,83	7,3	E
30	79+625.5696	80+023.4101	800	397,84	28,5	D
31	80+097.0548	80+313.6001	600	216,55	20,7	E
32	80+558.3645	80+839.0176	1.200	280,65	13,4	D
33	81+908.5831	82+422.7713	3.000	514,19	9,8	D
34	83+280.3372	83+994.2049	1.200	713,87	34,1	E
35	84+348.4411	85+178.2364	2.000	829,80	23,8	D
36	86+688.8897	86+772.6653	1.000	83,78	4,8	E
37	90+617.3962	91+576.5093	7.000	959,11	7,9	E
38	100+724.1933	101+070.0725	7.000	345,88	2,8	D
39	102+918.2937	103+299.8166	7.000	381,52	3,1	D
40	103+967.7981	104+679.4411	2.500	711,64	16,3	E
41	108+157.4483	108+199.7413	1.000	42,29	2,4	E
42	110+243.4240	110+847.6466	3.000	604,22	11,5	E
43	113+221.1431	113+307.8542	1.000	86,71	5,0	E

TABELA A.4 – Curvas da Rodovia Ayrton Senna / Carvalho Pinto.

Curva	Estaca Início	Estaca Fim	R (m)	D (m)	Δ (°)	Sentido (E/D)
1	0+181.9590	0+385.3368	500	203,38	23,3	D
2	0+638.2432	0+886.9560	500	248,71	28,5	E
3	1+451.0200	1+680.4503	600	229,43	21,9	D
4	1+985.5316	2+338.9402	500	353,41	40,5	E
5	2+500.6906	2+805.9127	450	305,22	38,9	D
6	2+988.5233	3+301.9926	800	313,47	22,5	E
7	3+679.8340	3+918.8519	150	239,02	91,3	D

TABELA A.4 – Curvas da Rodovia Ayrton Senna / Carvalho Pinto.

Curva	Estaca Início	Estaca Fim	R (m)	D (m)	Δ (°)	Sentido (E/D)
8	4+370.9728	4+553.9099	800	182,94	13,1	E
9	5+168.9187	5+274.7602	800	105,84	7,6	D
10	5+671.2015	5+784.1060	800	112,90	8,1	E
11	5+853.1323	5+957.6151	800	104,48	7,5	E
12	6+256.9557	6+367.5456	800	110,59	7,9	D
13	7+998.3606	8+971.3494	1.400	972,99	39,8	E
14	10+063.4046	12+369.1947	2.500	2.305,79	52,8	D
15	13+981.0754	15+835.9795	2.900	1.854,90	36,6	E
16	16+795.5026	17+999.5522	2.500	1.204,05	27,6	D
17	19+258.3584	19+871.1319	1.300	612,77	27,0	E
18	21+257.9888	21+746.6034	1.600	488,61	17,5	E
19	22+593.5589	24+026.6692	1.800	1.433,11	45,6	D
20	25+863.1767	26+191.3447	2.000	328,17	9,4	E
21	28+121.3196	28+623.8618	1.400	502,54	20,6	E
22	29+965.1166	30+495.0577	2.500	529,94	12,1	D
23	31+769.6347	32+603.9572	1.800	834,32	26,6	D
24	34+408.9643	34+561.1205	600	152,16	14,5	E
25	35+347.1841	35+753.1617	1.000	405,98	23,3	D
26	37+120.5564	37+479.7706	700	359,21	29,4	E
27	38+860.9837	39+073.5818	2.000	212,60	6,1	E
28	40+574.4369	41+112.3308	700	537,89	44,0	D
29	41+712.5749	42+187.8381	500	475,26	54,5	E
30	43+503.9023	44+264.7954	1.000	760,89	43,6	D
31	44+553.1744	44+884.5478	500	331,37	38,0	E
32	46+029.8605	46+512.2002	900	482,34	30,7	D
33	47+565.6340	48+097.3553	1.800	531,72	16,9	E
34	48+333.2796	48+988.2889	950	655,01	39,5	D
35	49+131.8483	49+745.5312	950	613,68	37,0	E
36	50+176.8132	50+873.6662	900	696,85	44,4	D
37	51+387.2888	51+714.1753	750	326,89	25,0	E
38	52+076.5998	52+232.0845	800	155,48	11,1	D
39	53+577.7995	53+917.1430	700	339,34	27,8	E
40	54+061.7101	54+685.4824	700	623,77	51,1	D
41	54+986.3608	55+266.2581	700	279,90	22,9	E
42	55+739.3042	55+987.1359	700	247,83	20,3	D

TABELA A.4 – Curvas da Rodovia Ayrton Senna / Carvalho Pinto.

Curva	Estaca Início	Estaca Fim	R (m)	D (m)	Δ (°)	Sentido (E/D)
43	56+291.8489	56+664.2148	800	372,37	26,7	E
44	57+270.0714	57+923.5517	1.500	653,48	25,0	D
45	58+645.8280	59+385.1783	800	739,35	53,0	E
46	60+698.9334	60+938.1131	1.000	239,18	13,7	D
47	61+858.7377	62+369.5065	2.000	510,77	14,6	D
48	63+583.0738	63+947.7082	1.100	364,63	19,0	D
49	64+775.1596	65+203.6235	1.000	428,46	24,5	E
50	65+372.4610	65+712.8401	1.000	340,38	19,5	D
51	66+486.2926	66+735.4414	600	249,15	23,8	D
52	66+997.5101	67+492.4082	600	494,90	47,3	E
53	68+206.5086	68+635.6199	800	429,11	30,7	E
54	68+835.1382	68+983.6084	300	148,47	28,4	D
55	69+275.5839	69+467.6108	300	192,03	36,7	E
56	69+688.6397	69+835.2935	600	146,65	14,0	D
57	71+687.5124	72+025.5933	1.200	338,08	16,1	D
58	74+142.6232	75+884.2804	3.500	1.741,66	28,5	E
59	76+612.8031	78+219.2581	2.300	1.606,46	40,0	D
60	78+524.6688	78+979.9783	1.000	455,31	26,1	E
61	79+285.0429	79+765.6456	1.400	480,60	19,7	D
62	82+266.1790	82+429.4698	1.000	163,29	9,4	E
63	83+404.8858	83+744.9250	1.000	340,04	19,5	D
64	86+195.7714	86+667.1074	800	471,34	33,8	D
65	87+309.8560	88+279.4990	1.200	969,64	46,3	E
66	88+564.1342	89+019.5392	800	455,40	32,6	D
67	89+472.4148	90+068.6254	1.700	596,21	20,1	E
68	92+153.9565	92+980.5259	1.600	826,57	29,6	E
69	95+067.2910	97+032.8906	2.000	1.965,60	56,3	D
70	97+659.9122	99+473.5761	3.200	1.813,66	32,5	E
71	100+520.0957	100+956.8188	850	436,72	29,4	D
72	102+222.3657	102+439.7719	750	217,41	16,6	E
73	102+806.9952	102+920.5229	1.000	113,53	6,5	D
74	103+620.8648	104+407.7910	800	786,93	56,4	E
75	104+824.3875	105+822.5908	1.300	998,20	44,0	D
76	107+208.7488	108+712.6283	1.700	1.503,88	50,7	D
77	109+312.5473	109+925.4390	800	612,89	43,9	E

TABELA A.4 – Curvas da Rodovia Ayrton Senna / Carvalho Pinto.

Curva	Estaca Início	Estaca Fim	R (m)	D (m)	Δ (°)	Sentido (E/D)
78	110+408.0791	110+636.3870	800	228,31	16,4	D
79	111+347.2694	113+557.1010	2.700	2.209,83	46,9	E
80	114+064.2399	114+160.8010	600	96,56	9,2	D
81	114+546.2671	114+812.0062	800	265,74	19,0	E
82	115+552.2020	115+654.0535	800	101,85	7,3	D
83	116+911.1304	117+381.7618	650	470,63	41,5	E
84	117+807.6417	118+409.6418	500	602,00	69,0	D
85	118+627.5261	119+450.4687	700	822,94	67,4	E
86	119+607.9567	119+929.7596	800	321,80	23,0	E
87	120+214.4217	121+020.2130	450	805,79	102,6	D
88	121+216.4416	121+531.2962	600	314,85	30,1	E
89	121+927.0448	122+283.1971	600	356,15	34,0	D
90	122+573.5284	122+756.1776	500	182,65	20,9	E

FOLHA DE REGISTRO DO DOCUMENTO

1. CLASSIFICAÇÃO/TIPO TC	2. DATA 9 de novembro de 2018	3. DOCUMENTO Nº DCTA/ITA/TC-039/2018	4. Nº DE PÁGINAS 54
5. TÍTULO E SUBTÍTULO: Análise crítica dos traçados geométricos das rodovias Presidente Dutra e Ayrton Senna/Carvalho Pinto, trecho entre Taubaté-SP e São Paulo-SP			
6. AUTOR(ES): Lorival Görgen Filho			
7. INSTITUIÇÃO(ÕES)/ÓRGÃO(S) INTERNO(S)/DIVISÃO(ÕES): Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA			
8. PALAVRAS-CHAVE SUGERIDAS PELO AUTOR: Rodovia; Projeto Geométrico; Alinhamento Horizontal.			
9. PALAVRAS-CHAVE RESULTANTES DE INDEXAÇÃO: Rodovias; Estradas; Projetos; Engenharia de transportes; Engenharia civil.			
10. APRESENTAÇÃO: ☒ Nacional ☐ Internacional ITA, São José dos Campos, Curso de Graduação em Engenharia Civil-Aeronáutica. Orientador: Ronaldo Gonçalves de Carvalho. Publicado em 2018.			
11. RESUMO: O presente trabalho de graduação se propõe a realização de um estudo comparativo entre os traçados das Rodovias Presidente Dutra, projetado e construído na década de 50, e do sistema Ayrton Senna / Carvalho Pinto, datado das décadas de 80 e 90, no trecho entre as cidades de Taubaté-SP e São Paulo-SP, com o objetivo de se verificar eventuais não conformidades com os requisitos atuais de projeto geométrico de estradas vigentes no Brasil. O trabalho iniciará com uma revisão bibliográfica na área de projeto geométrico de estradas. Em seguida, deverão ser obtidas imagens de alta definição de toda a área de estudo e realizado o georreferenciamento das mesmas. Com o auxílio do software <i>Bentley PowerCivil</i> será então modelado o traçado geométrico das duas rodovias de forma a se obter todos os parâmetros de alinhamento horizontal (ângulos de deflexão, comprimentos de tangentes, espirais e curvas circulares, raios de curva, etc.). Por fim, será realizada a análise dos elementos geométricos para identificação de eventuais não conformidades com as normas técnicas vigentes.			
12. GRAU DE SIGILO: ☒ OSTENSIVO☐ RESERVADO☐ SECRETO			