MAKI ARAKAWA

CONTRIBUIÇÃO AO ESTABELECIMENTO DO COMPRIMENTO DESEJÁVEL DA
ESPIRAL DE TRANSIÇÃO EM RODOVIAS RURAIS E URBANAS

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do Título de Mestre em
Engenharia.

São Paulo

2013

MAKI ARAKAWA

CONTRIBUIÇÃO AO ESTABELECIMENTO DO COMPRIMENTO DESEJÁVEL DA
ESPIRAL DE TRANSIÇÃO EM RODOVIAS RURAIS E URBANAS

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do Título de Mestre em
Engenharia.

Área de Concentração:

Engenharia de Transportes

Orientador:

Prof. Dr. Felipe Issa Kabbach Junior

São Paulo

2013

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 15 de janeiro de 2013.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Arakawa, Maki

Contribuição ao estabelecimento do comprimento desejável da espiral de transição em rodovias rurais e urbanas / M.

Arakawa. -- ed.rev. São Paulo, 2013.

132 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes.

1.Espiral de transição 2.Superelevação 3.Hidroplanagem I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Transportes II. t.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Dr. Felipe Issa Kabbach Jr. pela orientação e tempo investido durante todo o trabalho.

Aos meus familiares, sobretudo aos meus pais, pelo amor, dedicação e principalmente pela educação dada.

Ao meu esposo Fábio pela ajuda e compreensão nos momentos difíceis.

À Vetec Engenharia LTDA. pelo incentivo dado para realizar o mestrado.

E aos colegas de trabalho por todas as contribuições, em especial ao meu chefe Antonio Jose Ferreira, por compartilhar seu conhecimento técnico e Aurenice da Cruz Figueira, sempre pronta a dar sugestões de melhorias no trabalho.

RESUMO

A curva de transição apresenta um raio de curvatura variando de um valor infinito no fim da tangente até um valor igual ao raio da curva circular no final da curva de transição. Nos projetos rodoviários, o tipo de curva mais utilizado é a clotóide, pois esta corresponde à trajetória descrita pelo veículo, com uma velocidade constante e o volante girando com velocidade angular constante. Consequentemente, é uma situação em que não requer esforço do motorista, proporciona uma trajetória mais natural e um aumento/redução da aceleração radial de um veículo de forma gradual. O presente trabalho admite que o comprimento desejável da espiral de transição em rodovias rurais e urbanas, baseado na recomendação da AASHTO (2011), é igual à distância correspondente a um tempo de percurso de 2 segundos ao longo da via à velocidade de projeto.

É recomendável que o comprimento considerado como desejável seja suficiente para se realizar a transição da superelevação, e por outro lado, deve ser menor que o comprimento crítico de hidroplanagem, ou seja, comprimento a partir do qual o veículo passa a perder contato do pneu/pavimento em uma pista coberta com lâmina d'água, a uma velocidade crítica.

Visto que os manuais brasileiros não introduzem a hidroplanagem como um dos fatores considerados para estabelecer estes comprimentos, pretende-se desenvolver uma ferramenta de trabalho que auxilia na determinação do comprimento desejável da espiral de transição, possibilitando uma análise do risco de ocorrência do fenômeno da hidroplanagem.

No estudo de caso, são calculados comprimentos da espiral de transição de três curvas, onde serão feitas também simulações com diferentes parâmetros para analisar as situações críticas de hidroplanagem. Os resultados obtidos demonstram que comprimentos muito longos da espiral de transição, combinado com uma declividade longitudinal muito baixa pode aumentar o risco de hidroplanagem.

Palavras Chave: Espiral de Transição, Clotóide, Superelevação, Hidroplanagem.

ABSTRACT

The transition curve has a radius of curvature varying from infinity at the end of the tangent to a value equal to the radius of the circular arc at the end of the transition curve. In highway design, clothoid is the most commonly used spiral type because it corresponds to the path described by the vehicle, with a constant speed and the less need for steering. Consequently, it's a situation that doesn't require driver effort, providing a more natural path and a gradual increase / reduction of the centrifugal force of a vehicle.

Based on AASHTO (2011)'s recommendation, this study establishes that the desired length of the spiral transition in highways and streets is equal to the distance traveled in 2 seconds in the design speed.

It's recommended that the spiral length considered as desirable is sufficient to perform the superelevation runoff and on the other hand, should be shorter than the critical length of hydroplaning, in other words, it's a phenomenon caused by the increase of the water film above the contact pressure of tire and road.

Since the manuals do not introduce hydroplaning as one of the criteria considered in establishing these lengths, a tool will be developed to define the desirable spiral length, allowing an analysis of the risk of hydroplaning.

In the study, the lengths of three spiral transition curves are calculated; furthermore simulations with different parameters of these three curves are also calculated to analyze critical situations of hydroplaning. The results demonstrate that longer lengths of spiral transition combined with lower grades may increase the risk of hydroplaning.

Keywords: Spiral Curve, Clothoid, Superelevation, Hydroplaning

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Curva de distribuição de frequência acumulada de velocidades.....	22
Figura 2.2 - Observador inercial	23
Figura 2.3 - Observador não inercial	24
Figura 2.4 - Forças que atuam sobre um veículo em curva	24
Figura 2.5 - Aspecto da espiral de transição	29
Figura 2.6 - Curva com espiral de transição	32
Figura 2.7 - Curva sem espiral de transição	32
Figura 2.8 - Elementos das espirais de transição	34
Figura 2.9 – Percurso ao longo da curva de transição	35
Figura 2.10 - Transição da superelevação na espiral com eixo de rotação no eixo da pista	39
Figura 2.11 - Transição da superelevação na espiral com eixo de rotação no bordo interno	40
Figura 3.1 – Deslocamento lateral versus raio de curvatura	56
Figura 3.2 – Tempo de esterção versus raio de curvatura.....	57
Figura 3.3 – Velocidade operacional versus raio de curvatura	59
Figura 3.4 – Taxa de desaceleração versus raio de curvatura	60
Figura 3.5 – Comprimento da espiral versus raio da curvatura	62
Figura 4.1 - Vista do pneu sobre o pavimento	64
Figura 4.2 - Trecho com risco de hidroplanagem.....	65
Figura 4.3 - Percurso d'água na tangente	66
Figura 4.4 - Gráfico da superelevação.....	67
Figura 4.5 - Linhas de água entrando na curva com uma rampa descendente	68
Figura 4.6 – Quadrantes e eixo de coordenadas da espiral de transição – CASO 1.....	69
Figura 4.7 – Quadrante I da espiral de entrada em destaque	70
Figura 4.8 – Quadrante II da espiral de entrada em destaque	71
Figura 4.9 – Quadrante III da espiral de entrada em destaque	72
Figura 4.10 – Quadrante IV da espiral de entrada em destaque	72
Figura 4.11 - Linhas de água saindo da curva com uma rampa descendente	73
Figura 4.12 – Quadrantes e eixo de coordenadas da espiral de transição – CASO 2.....	74
Figura 4.13 – Quadrante I da espiral de saída em destaque.....	75
Figura 4.14 – Quadrante II da espiral de saída em destaque.....	75
Figura 4.15 – Quadrante III da espiral de saída em destaque.....	76
Figura 4.16 – Quadrante IV da espiral de saída em destaque	77
Figura 4.17 – Fluxograma para cálculo do percurso d'água.....	79
Figura 4.18 – Fluxograma para verificação da existência do risco de hidroplanagem	80
Figura 4.19 - Gráfico das equações de Agrawal e Gallaway.....	86
Figura 4.20 - Modelo teórico do tratamento superficial betuminoso rugoso	88
Figura 4.21 - Área molhada de um triângulo e de todo o canal	89
Figura 4.22 - Modelo teórico do tratamento superficial betuminoso liso.....	90
Figura 4.23 - Área molhada de um canal e de todo o canal.....	91
Figura 5.1 – Percurso da gota d'água nos quatro quadrantes da curva 1 (Caso 1)	105
Figura 5.2 – Percurso da gota d'água nos quatro quadrantes da curva 2 (Caso 2)	105
Figura 5.3 – Percurso da gota d'água nos quatro quadrantes da curva 3 (Caso 3)	106

Figura 5.4 – Comprimento da Espiral (m) X Parâmetro w (curva 1)	114
Figura 5.5 – Comprimento da Espiral (m) X Parâmetro w (curva 3)	116

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Características gerais de cada classe de projeto	20
Tabela 2.2 – Relação entre a classe funcional e classe de projeto	21
Tabela 2.3 – Principais parâmetros de projeto	21
Tabela 2.4 - Valores máximos admissíveis de coeficiente de atrito transversal.....	28
Tabela 2.5 - Valores dos raios acima dos quais podem ser dispensadas curvas de transição.....	42
Tabela 2.6 - Raios mínimos acima dos quais podem ser dispensadas as clotóides em uma sequencia “tangente independente-curva circular”	43
Tabela 3.1 - Comprimentos mínimos absolutos de L.....	46
Tabela 3.2 – Gradiente relativo para pista simples com eixo de rotação no centro	48
Tabela 3.3 - Fator de majoração para eixo de rotação fora do centro	49
Tabela 3.4 – Gradiente relativo do projeto padrão de geometria.....	50
Tabela 3.5 – Máximo gradiente relativo	50
Tabela 3.6 - Dados coletados durante a esterção com e sem espiral.....	55
Tabela 3.7 – Velocidades operacionais coletadas em curvas com diferentes raios	58
Tabela 3.8 – Dados coletados em locais com raios pequenos	59
Tabela 3.9 - Variáveis calculadas a partir do raio da curva	61
Tabela 4.1 - Informações sobre o posto pluviométrico do IAG	81
Tabela 4.2 - Previsão de máximas intensidades de chuvas em São Paulo (mm/h)	82
Tabela 4.3 - Classificação da intensidade de precipitação	82
Tabela 4.4 – Velocidades utilizando equação de Agrawall	84
Tabela 4.5 – Velocidades utilizando equação de Gallaway.....	85
Tabela 5.1 - Dados iniciais necessários para cálculo do comprimento da espiral	96
Tabela 5.2 – Comprimentos mínimos da espiral de transição	98
Tabela 5.3 – Comprimentos máximos da espiral de transição	99
Tabela 5.4 – Comprimentos da espiral calculados pela equação de Perco (2005).....	100
Tabela 5.5 – Características das três curvas.....	101
Tabela 5.6 – Comprimentos mínimos das três curvas	102
Tabela 5.7 – Cálculo do parâmetro w	106
Tabela 5.8 – Resumo do parâmetro w crítico das curvas para cada pavimento	110
Tabela 5.9 – Comprimentos mínimos para Classe IB, velocidade 80 km/h e $e_{\text{máx}}$ 8%	111
Tabela 5.10 – Comprimentos mínimos para Classe 0, velocidade 100 km/h e $e_{\text{máx}}$ 8%	112
Tabela 5.11 – Valores do parâmetro w para diferentes comprimentos da clotóide	113
Tabela 5.12 – Variação do parâmetro w em função da declividade longitudinal r% para L=175 m... 113	
Tabela 5.13 – Comprimento da espiral versus parâmetro w (curva 1).....	114
Tabela 5.14 - Comprimento da espiral versus parâmetro w (curva 3).....	116

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	- American Association of Highway and Transportation Officials
DAEE	- Departamento de Águas e Energia Elétrica
DER/SP	- Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo
DNER	- Departamento Nacional de Estradas e Rodagem (atual DNIT)
DNIT	- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
IAG	- Instituto Astronômico e Geofísico da Universidade de São Paulo
IPR	- Instituto de Pesquisas Rodoviárias
TRRL	- Transport and Road Research Laboratory
TRB	- Transportation Research Board

LISTA DE SÍMBOLOS

A	=	Parâmetro da clotóide
a	=	Taxa de aceleração radial (m/s^2)
AC	=	Ângulo central da curva
C	=	Taxa máxima admissível de variação da aceleração centrífuga (m/s^3)
CC	=	Centro da curva circular
CE	=	Circular – espiral
C_e	=	Coeficiente de escoamento
D	=	Desenvolvimento circular (m)
d	=	Distância do eixo de rotação ao bordo mais afastado da pista de rolamento (m)
D_c	=	Corda da curva circular
d_{v85}	=	Desaceleração calculada pelo V_{85} percentil (m/s^2)
E	=	Distância externa da curva com clotóide
EC	=	Espiral – circular
ET	=	Espiral – tangente
e	=	Superelevação alcançada na curva circular (m/m)
$e_{\text{máx}}$	=	Superelevação máxima (m/m)
ε_1	=	Altura das rugosidades do pavimento
F	=	Força centrífuga (N)
F_{at}	=	Força de atrito (N)
F_m	=	Fator de majoração para comprimento da espiral (adimensional)
f_{at}	=	Coeficiente de atrito lateral do pavimento (adimensional)
g	=	Aceleração gravitacional (m/s^2)
g_r	=	Taxa básica de superelevação admissível (%) ou gradiente relativo
h	=	Altura da lâmina d'água (m)
l	=	Deflexão entre tangentes
i	=	Declividade transversal na tangente (%)
i_f	=	Declividade média da linha de escoamento d'água (%)
i_p	=	Intensidade de precipitação ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)
K	=	Coeficiente de rugosidade
L	=	Comprimento da espiral de transição (m)
l	=	Largura da faixa de rolamento (m)
l_f	=	Desenvolvimento das linhas de escoamento (m)
m	=	Massa do veículo (kg)
N	=	Força normal de reação à componente da força peso (N)
P	=	Força Peso (N)

P	=	Afastamento da curva circular em relação à tangente (m)
PI	=	Ponto de Interseção
P_t	=	Pressão de enchimento do pneu (kPa)
q	=	Abscissa do centro da curva circular
ρ	=	Raio de curvatura em um ponto qualquer da curva de transição (m)
R	=	Raio da curva circular (m)
r	=	Declividade longitudinal ou greide (%)
S_c	=	Ângulo de deflexão da clotóide
S_v	=	Distância de visibilidade durante a chuva (m)
SD	=	Velocidade <i>spin down</i> (perda de aderência)
θ	=	Ângulo central circular
t	=	Duração da chuva (minutos)
t_{ester}	=	Tempo de esterção (segundos)
T	=	Período de retorno (anos)
TD	=	Ranhura dos pneus (mm)
TE	=	Tangente – espiral
TT	=	Tangente total
T_C	=	Tangente curta
T_L	=	Tangente longa
V	=	Velocidade (km/h)
V_{85}	=	Velocidade operacional (85° percentil) (km/h)
X_c	=	Abscissa dos pontos EC e CE
Y_c	=	Ordenada dos pontos EC e CE

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVO	16
1.2	JUSTIFICATIVA	17
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	18
2	ASPECTOS GERAIS	19
2.1	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1.1	<i>Classificação das rodovias .....</i>	<i>19</i>
2.1.2	<i>Velocidade de projeto e de operação .....</i>	<i>22</i>
2.1.3	<i>Raio mínimo de curvatura horizontal .....</i>	<i>23</i>
2.1.4	<i>Valores máximos admissíveis para a superelevação .....</i>	<i>26</i>
2.1.5	<i>Valores máximos admissíveis para fator de atrito transversal pneu/pavimento .....</i>	<i>27</i>
2.1.6	<i>Valores de superelevação para raios superiores aos mínimos .....</i>	<i>28</i>
2.2	ESPIRAL DE TRANSIÇÃO	29
2.2.1	<i>Vantagens do emprego da espiral de transição .....</i>	<i>31</i>
2.2.2	<i>Elementos da espiral de transição .....</i>	<i>33</i>
2.2.3	<i>Equação espontânea da espiral de transição .....</i>	<i>34</i>
2.2.4	<i>Transição da superelevação ao longo da clotóide .....</i>	<i>37</i>
2.2.5	<i>Casos em que é dispensável o uso da curva de transição .....</i>	<i>41</i>
3	CRITÉRIOS DE FIXAÇÃO DO COMPRIMENTO DA ESPIRAL DE TRANSIÇÃO	44
3.1	COMPRIMENTO MÍNIMO DAS CLOTÓIDES	44
3.1.1	<i>Critério da taxa máxima admissível de variação da aceleração centrífuga .....</i>	<i>44</i>
3.1.2	<i>Critério do comprimento mínimo absoluto de L .....</i>	<i>46</i>
3.1.3	<i>Critério da Máxima Rampa de Superelevação Admissível .....</i>	<i>47</i>
3.1.3.1	<i>Expressões apresentadas nas Notas Técnicas do DER/SP (2006) e DNIT (2010a) .....</i>	<i>48</i>
3.1.3.2	<i>Expressões apresentadas por Projeto Padrão DER/SP (2006) e Austroads (2003) .....</i>	<i>50</i>
3.1.4	<i>Critério de fluência ótica .....</i>	<i>51</i>
3.1.5	<i>Valor mínimo do parâmetro “p” .....</i>	<i>52</i>
3.2	COMPRIMENTO MÁXIMO DA CLOTÓIDE	52
3.2.1	<i>Critério do máximo ângulo central da clotóide .....</i>	<i>52</i>
3.2.2	<i>Critério do tempo de percurso .....</i>	<i>53</i>
3.2.3	<i>Valor máximo do parâmetro “p” .....</i>	<i>53</i>
3.3	MODELO DE CÁLCULO PARA O COMPRIMENTO DESEJÁVEL DA CLOTÓIDE (PERCO, 2005)	54
3.3.1	<i>Tempo de esterção .....</i>	<i>57</i>
3.3.2	<i>Velocidade operacional .....</i>	<i>57</i>
3.3.3	<i>Taxa de desaceleração .....</i>	<i>59</i>
3.3.4	<i>Expressão do modelo de Perco (2005) .....</i>	<i>60</i>
4	HIDROPLANAGEM	63
4.1	CÁLCULO DO PARÂMETRO W	65
4.1.1	<i>Percurso da gota d’água no caso 1 .....</i>	<i>68</i>
4.1.2	<i>Percurso da gota d’água no caso 2 .....</i>	<i>73</i>
4.2	CÁLCULO DO PARÂMETRO W _{CRÍTICO}	80
4.2.1	<i>Seleção da chuva representativa .....</i>	<i>81</i>

4.2.2	<i>Velocidade crítica para ocorrência da hidroplanagem e altura da lâmina d'água</i>	83
4.2.3	<i>Tipo do pavimento</i>	88
4.2.3.1	Macrorrugosidade e microrrugosidade elevadas	88
4.2.3.2	Macrorrugosidade elevada e microrrugosidade baixa	90
4.2.3.3	Macrorrugosidade baixa e microrrugosidade elevada	92
4.2.3.4	Macrorrugosidade e microrrugosidade baixas	92
4.3	ANÁLISE DO RISCO DA HIDROPLANAGEM	93
5	ESTUDO DE CASO	94
5.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	94
5.2	DADOS DE ENTRADA	94
5.3	VALORES-LIMITE PARA COMPRIMENTO DA ESPIRAL DE TRANSIÇÃO	96
5.3.1	<i>Critérios para comprimento mínimo da clotóide</i>	97
5.3.2	<i>Critério para comprimento máximo da clotóide</i>	98
5.4	DEFINIÇÃO DO COMPRIMENTO DA CLOTÓIDE	99
5.4.1	<i>Análise quanto à taxa máxima admissível da variação da aceleração centrífuga</i>	102
5.4.2	<i>Análise quanto à máxima rampa de superelevação admissível</i>	102
5.4.3	<i>Análise da hidroplanagem</i>	104
5.4.3.1	Cálculo do parâmetro w	104
5.4.3.2	Cálculo do parâmetro w crítico	106
5.4.3.3	Resultados da hidroplanagem	109
5.5	SIMULAÇÕES COM DIFERENTES PARÂMETROS	110
5.5.1	<i>Comprimento mínimo para transição da superelevação</i>	110
5.5.2	<i>Hidroplanagem em pista simples</i>	112
5.5.3	<i>Hidroplanagem em pista dupla</i>	115
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	119
	REFERÊNCIAS	122
	ANEXO A	126
	ANEXO B	129

1 INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos, a expansão do sistema viário e o crescimento do volume de tráfego tornaram necessárias várias adaptações e atualizações de manuais e textos técnicos para o Projeto Geométrico de Rodovias. Os elementos básicos do projeto geométrico são: alinhamento horizontal, vertical e seção transversal.

Ao entrar em uma curva circular horizontal, os motoristas conduzem seus veículos segundo uma trajetória de transição com curvatura ascendente, pois não é possível fazer a esterção de forma que o veículo passe instantaneamente da trajetória retilínea para uma trajetória circular. A maneira mais propícia para suavizar esta passagem do trecho em tangente para o trecho em curva circular consiste em utilizar uma curva de transição.

As curvas de transição foram inicialmente utilizadas em ferrovias, concebidas como uma sucessão de duas ou três curvas circulares de raios descendentes ou ascendentes. A parábola cúbica foi aplicada em ferrovias inicialmente em 1871 e foi utilizada por muitos anos, por atender aos requisitos de transição nos casos de grandes raios de curvatura e comprimentos longos de curva de transição, além de apresentar facilidade matemática para o cálculo de suas coordenadas. Posteriormente, as espirais de Euler (clotóide ou espiral de transição) passaram a ser usadas em traçados ferroviários, onde a variação da curvatura ocorre de forma linear em toda sua extensão.

Além de evitar uma trajetória incômoda para os usuários, o uso da espiral de transição em ferrovias evita o desgaste excessivo dos trilhos, sendo desejável que seu comprimento seja o menor possível para minimizar os gastos de construção e de manutenção da via, levando-se em consideração algumas limitações devido à rampa de superelevação.

Em rodovias, onde os raios de curvatura são em geral inferiores aos utilizados nas curvas ferroviárias, a clotóide também tem sido considerada a mais adequada, sendo geralmente adotada uma simetria entre a espiral de entrada e saída. O projeto de uma rodovia segura requer a inserção de curvas de transição entre as tangentes e a maioria das curvas circulares (especialmente de raios menores) para minimizar os efeitos negativos apresentados nos trechos curvos, proporcionando

maior equilíbrio entre redução/crescimento da superelevação e redução/crescimento da aceleração centrífuga, aparência satisfatória da via e atendendo às condições adequadas de segurança e conforto na entrada e saída da curva.

Uma das principais vantagens da adoção da clotóide como curva de transição é que esta corresponde à trajetória descrita pelo veículo sobre pneus, deslocando-se em velocidade constante, quando o volante é girado com velocidade angular constante e proporcionando uma trajetória mais natural para ser seguida pelos motoristas (DER/SP, 2006).

1.1 Objetivo

Este trabalho tem como objetivo principal apresentar uma contribuição para o estabelecimento do comprimento desejável da espiral de transição. Para garantir a eficácia da espiral de transição, é importante que o comprimento da clotóide seja fixado de forma adequada, devendo atender aos critérios de máximos e mínimos impostos, relacionados à percepção visual do motorista, aspectos de segurança, estética e conforto.

No contexto do objetivo principal almejado, os objetivos específicos deste trabalho são:

- 1) Assumir para o comprimento desejável da espiral de transição, o valor definido no critério recomendado pela AASHTO (2011), que corresponde ao percurso durante 2 segundos à velocidade de projeto e também, utilizando-se do modelo de Perco (2005), com base na revisão bibliográfica.
- 2) Verificação e análise do comprimento considerado como desejável:
  - 2a) Análise quanto à taxa máxima admissível da variação da aceleração centrífuga;
  - 2b) Verificar se os valores considerados como desejáveis para o comprimento da espiral são suficientes para se efetuar a transição adequada da superelevação, garantindo conforto e aparência satisfatórios, limitando-se a máxima diferença admissível entre os perfis longitudinais do eixo de rotação e da borda mais afastada da pista, diferença esta conhecida como gradiente

relativo. Caso tais valores de comprimento sejam insuficientes, será proposto o tratamento a ser aplicado a tal transição;

2c) Verificar a possibilidade de ocorrência ou não do fenômeno da hidroplanagem (ou aquaplanagem): se o comprimento considerado como desejável apresentar riscos de hidroplanagem, sendo que, em caso positivo de ocorrência, serão propostas alternativas para solução ou minimização do problema, como, por exemplo, o aumento da declividade longitudinal da pista no local em questão ou até mesmo a imposição de redução de velocidade máxima regulamentada no local (em condições de chuva).

1.2 Justificativa

O projeto geométrico de uma rodovia deve ser elaborado de forma a garantir conforto e segurança aos usuários, harmonizando os elementos de planta, perfil e seção transversal e, além disso, almejando eficiência operacional, integração satisfatória com o meio ambiente e a viabilidade econômica.

Entre os vários elementos geométricos que compõe um traçado, foi escolhido como objeto de estudo a espiral de transição, detalhando os critérios que permitem determinar valores-limites aceitáveis para o comprimento desta, pois é comum surgirem dúvidas quanto à seleção do critério a utilizar nos projetos viários dentre aqueles usualmente apresentados nos manuais de projeto geométrico.

Visto que os manuais brasileiros não introduzem a hidroplanagem como um dos fatores considerados para estabelecer estes comprimentos, tal fenômeno também será analisado no presente trabalho, sendo a possibilidade de sua ocorrência avaliada em função da intensidade pluviométrica e das características geométricas da via. Adicionalmente, no caso do comprimento desejável resultar relativamente reduzido, há necessidade de verificação da suficiência da transição da superelevação.

1.3 Estrutura do Trabalho

O presente trabalho foi estruturado em seis capítulos, definidos a seguir:

O Capítulo 1 consiste na apresentação do trabalho, de seus objetivos e da justificativa da escolha do tema.

No Capítulo 2 é feita uma revisão bibliográfica dos conceitos relacionados às curvas de um alinhamento horizontal, especialmente aqueles referentes à espiral de transição, abordando seus principais elementos e as vantagens da sua utilização, além de definir os casos em que é dispensável o uso de tal curva de transição.

Os critérios atualmente recomendados em manuais técnicos para fixação dos comprimentos máximos, mínimos e desejáveis das espirais de transição são abordados no Capítulo 3, tendo-se como referências básicas o “Manual de Projeto Geométrico de Rodovias Rurais” (1999) do IPR (Instituto de Pesquisas Rodoviárias), órgão de pesquisa do antigo DNER (Departamento Nacional de Estradas de Rodagem), atual DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes), as “Notas Técnicas de Projeto Geométrico” do DER/SP (2006), o “Manual de Projeto Geométrico de Travessias Urbanas” do DNIT (2010a) e “A Policy on Geometric Design of Highways and Streets” da AASHTO (2011). Ainda neste capítulo, é apresentado um modelo de cálculo para o comprimento desejável da clotóide, desenvolvido por Perco (2005).

O Capítulo 4 analisa o fenômeno da hidroplanagem, com cálculos que determinam a situação crítica na iminência da perda do contato pneu/pavimento.

Um estudo de caso é apresentado no Capítulo 5, utilizando-se uma planilha do Excel® para definir o comprimento desejável da clotóide de três curvas em rodovias de classes de projeto diferentes, com as quais são realizadas as verificações. Além disso, neste capítulo são feitas simulações variando-se alguns parâmetros com o intuito de analisar os comprimentos das espirais em situações críticas.

Por fim, o Capítulo 6 apresenta as conclusões obtidas no trabalho, soluções para os problemas encontrados e também sugestões para trabalhos futuros.

2 ASPECTOS GERAIS

2.1 Fundamentação teórica

Nos itens a seguir, são apresentados alguns conceitos e parâmetros relevantes para o objeto do trabalho, tais como classificação de rodovias, velocidade de projeto e de operação, raio mínimo de curvatura horizontal, superelevação e coeficiente de atrito transversal.

2.1.1 Classificação das rodovias

Nos estudos de implantação ou de melhorias em vias rurais e urbanas, são necessárias classificações com diferentes propósitos, de acordo com critérios administrativos, funcionais e técnicos.

A classificação administrativa não tem relação direta com o projeto geométrico, dependendo mais de aspectos institucionais, utilizada para indicar os níveis de responsabilidade governamental sobre as vias. As rodovias são normalmente indicadas por siglas alfanuméricas caracterizando localização e entidade responsável.

De acordo com o DER/SP (2006), a classificação funcional consiste em agrupar as rodovias de acordo com a posição hierárquica ocupada dentro da rede viária, definidas em função das características de uso e ocupação da região atravessada pela rodovia, volume de tráfego e distância média percorrida. As rodovias rurais brasileiras são divididas em três sistemas funcionais: arterial, coletor e local.

- Sistema arterial: é subdividido em principal, primário e secundário, destinado aos movimentos principais com elevados volumes de tráfego, integrando municípios, estados e países vizinhos;
- Sistema coletor: subdividido em primário e secundário, atende ao tráfego de menor porte complementando o sistema arterial, apresentando velocidades mais moderadas;

- Sistema local: é composto por rodovias com pequenas extensões, proporcionando acesso ao tráfego intramunicipal de áreas rurais e de pequenas localidades às rodovias pertencentes ao sistema coletor secundário.

Por fim, a classificação técnica considera as características geométricas da via a serem adotadas na concepção dos projetos, dividindo-se em cinco classes: 0 a IV, sendo a numeração mais baixa representada por um padrão de operação mais elevado, conforme apresentada na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Características gerais de cada classe de projeto

Classe	Características Gerais
0	Pista dupla
	Padrão técnico mais elevado
	Características de via expressa
	Controle total de acesso
I-A	Pista dupla
	Controle parcial de acesso
I-B	Pista simples de elevado padrão
II	Pista simples
III	Pista simples
IV	Pista simples

Fonte: DER/SP (2006), adaptado pela autora

A classificação técnica sofre influências do volume médio diário de tráfego, determinado para o 10~15º ano após a abertura da rodovia, do custo da construção e do relevo da região atravessada (se o terreno é plano, ondulado ou montanhoso), pois condições extremas exigem adaptações específicas das características técnicas.

A Tabela 2.2 relaciona esta classificação com as classes funcionais, de acordo com o Manual de Projeto Geométrico de Rodovias Rurais do DNER (1999).

A seguir é apresentada a Tabela 2.3, com algumas das principais características técnicas de projeto relevantes para o trabalho, para cada classe de projeto, segundo o relevo da região atravessada.

Tabela 2.2 – Relação entre a classe funcional e classe de projeto

Sistema	Classes Funcionais	Classes de Projeto
Arterial	Principal	Zero e I
	Primário	I
	Secundário	I e II
Coletor	Primário	II e III
	Secundário	III e IV
Local	Local	III e IV

Fonte: DNER (1999)

Tabela 2.3 – Principais parâmetros de projeto

PLANO	CLASSE				
	0	I	II	III	IV
Velocidade diretriz (km/h)	120	100	100	80	60
e	10%	10%	8%	8%	8%
Raio mínimo de curvatura (m)	540	345	375	230	125
Largura das faixas de rolamento (m)	3,6	3,6	3,6	3,5	3,0
Declividade máxima	3%	3%	3%	4%	4%

ONDULADO	CLASSE				
	0	I	II	III	IV
Velocidade diretriz (km/h)	100	80	70	60	40
e	10%	10%	8%	8%	8%
Raio mínimo de curvatura (m)	345	210	170	125	50
Largura das faixas de rolamento (m)	3,6	3,6	3,5	3,3	3
Declividade máxima	4%	4,50%	5%	6%	6%

MONTANHOSO	CLASSE				
	0	I	II	III	IV
Velocidade diretriz (km/h)	80	60	50	40	30
e	10%	10%	8%	8%	8%
Raio mínimo de curvatura (m)	210	115	80	50	25
Largura das faixas de rolamento (m)	3,6	3,6	3,3	3,3	3,0
Declividade máxima	5%	6%	7%	8%	8%

Fonte: DNER (1999), adaptado pela autora.

2.1.2 Velocidade de projeto e de operação

A velocidade é um dos principais elementos a condicionar o projeto rodoviário e tem participação na determinação da maioria das características técnicas da rodovia (DNIT, 2010a).

A velocidade de projeto (AASHTO, 2011) é o valor condicionante das principais características geométricas do projeto de rodovias tais como curvatura, superelevação e distância de visibilidade, refletindo nos custos de implantação da obra, fixada em função da via e das condições do uso do solo e do entorno, conhecida também como velocidade diretriz nos manuais do DNIT (2010a). É a maior velocidade percorrida por um veículo em um trecho com segurança.

Velocidade operacional é aquela na qual se observam os condutores operando seus veículos sob condições de fluxo livre. A V_{85} é a medida mais frequentemente utilizada como velocidade operacional, atingida por alguns, mas não excedida por 85% do total dos veículos. Corresponde a 85º percentil do gráfico de distribuição de velocidades (Frequências acumuladas), como mostra a Figura 2.1:

Figura 2.1 – Curva de distribuição de frequência acumulada de velocidades

Fonte: DER/SP (2006)

2.1.3 Raio mínimo de curvatura horizontal

Quando um veículo entra em uma curva com velocidade constante, para um observador inercial (situado fora do veículo), as forças atuantes (peso, força normal e força de atrito lateral) garantem a resultante centrípeta (F_{cp}) que altera a direção da velocidade. Por outro lado, para um observador não inercial (observador no interior do veículo), considera-se a existência da força centrífuga (f_{cf}) que faz com que o observador se sinta atirado para fora do carro. Esta força resulta do produto da massa do veículo pela sua aceleração radial:

$$F = \frac{m \cdot V^2}{R} \quad (2.1)$$

Sendo:

F: Força centrífuga (N)

m: Massa do veículo (kg)

V: Velocidade do veículo (m/s)

R: Raio da curva (m)

Figura 2.2 - Observador inercial

Figura 2.3 - Observador não inercial

Fonte: Notas de aula da disciplina PTR5725 (2009)

Visando contrabalançar a ação da força centrífuga, adota-se a superelevação, estabelecendo uma declividade transversal da pista nos trechos em curva, provocando um equilíbrio de forças e evitando a derrapagem do veículo. Nestes casos, a estabilidade dinâmica é garantida quando a força de atrito lateral for maior que a força que tende a arrastar o veículo para fora da pista.

O raio que garante estabilidade dinâmica do veículo percorrendo a curva a uma velocidade constante resulta do equilíbrio das forças nele atuantes conforme a dedução a seguir apresentada na Figura 2.4. Para isto, considera-se que o veículo é um corpo rígido e idealizado através de um modelo ponto massa e as forças resultantes atuam no centro de gravidade do veículo.

Figura 2.4 - Forças que atuam sobre um veículo em curva

Fonte: DER/SP (2006), adaptado pela autora

Considerando $F_{at} = N \cdot f_{at}$ e $N = P \cdot \cos \alpha + F \cdot \sin \alpha$, tem-se que:

$$F_{at} = (P \cdot \cos \alpha + F \cdot \sin \alpha) \cdot f_{at}$$

A força de atrito F_{at} deve ser maior ou igual a K , que é a força que tende a arrastar o veículo para fora da pista, representada da seguinte forma:

$$K = F \cdot \cos \alpha - P \cdot \sin \alpha$$

Ou seja:

$$F_{at} \geq K$$

$$(P \cdot \cos \alpha + F \cdot \sin \alpha) \cdot f_{at} \geq F \cdot \cos \alpha - P \cdot \sin \alpha$$

Dividindo a expressão por $\cos \alpha$, tem-se:

$$P \cdot f_{at} + F \cdot f_{at} \cdot \tan \alpha \geq F - P \cdot \tan \alpha$$

Considerando-se que:

$$F = \frac{m \cdot V^2}{R}$$

$$\tan \alpha = e$$

$$P = m \cdot g$$

Tem-se:

$$m \cdot g \cdot f_{at} + \frac{m \cdot V^2}{R} \cdot f_{at} \cdot e \geq \frac{m \cdot V^2}{R} - m \cdot g \cdot e$$

$$g \cdot f_{at} + \frac{V^2}{R} \cdot f_{at} \cdot e \geq \frac{V^2}{R} - g \cdot e$$

$$g \cdot (f_{at} + e) \geq \frac{V^2}{R} \cdot (1 - f_{at} \cdot e)$$

$$R \geq \frac{V^2 \cdot (1 - f_{at} \cdot e)}{g \cdot (e + f_{at})}$$

Desprezando $f_{at} \cdot e$, tem-se:

$$R \geq \frac{V^2}{g \cdot (e + f_{at})} \quad (2.2)$$

P: Força peso (N)

N: Força normal de reação à componente da força peso (N)

g: aceleração da gravidade (m/s^2)

e: superelevação (%)

f_{at} : Coeficiente de atrito lateral pneu/pavimento

Fat: Força de atrito lateral pneu/pavimento

α : inclinação da pista

V: Velocidade (m/s)

Para o estabelecimento do raio mínimo, considera-se $g = 9,8 \text{ m/s}^2$, a velocidade em km/h, os valores máximos admissíveis para o coeficiente de atrito lateral pneu/pavimento e para a superelevação, resultando na equação (2.3):

$$R_{\min} = \frac{V^2}{127 \cdot (e_{\max} + f_{at\max})} \quad (2.3)$$

Onde:

$R_{\min}$: Raio mínimo da curva circular (m)

V: Velocidade de projeto (km/h)

$e_{\max}$: superelevação máxima admissível (%)

$f_{at\max}$: máximo coeficiente de atrito lateral entre o pneu e pavimento (adimensional)

2.1.4 Valores máximos admissíveis para a superelevação

O valor máximo admissível para a superelevação é condicionado por fatores, tais como:

- Condições do clima;
- Topografia;
- Zona rural ou urbana
- Frequência de veículos lentos;
- Restrições de espaço para a transição da superelevação, principalmente nos casos de curvas reversas e pistas com muitas faixas;
- Razões econômicas.

Os valores adotados pelo DER/SP (2006) são:

- $e_{\max}$ 8%: em rodovias de padrão elevado ou intermediário;
- $e_{\max}$ 6%: em projetos condicionados por urbanização adjacente e frequentes

interseções que provocam redução de velocidade;

- $e_{\text{máx}}$ 4%: em vias com intensa ocupação adjacente do solo, sem vias marginais e com pouca flexibilidade para a transição da superelevação.

2.1.5 Valores máximos admissíveis para fator de atrito transversal pneu/pavimento

A derrapagem ocorre quando um ou mais pneus passam a deslizar, diminuindo a sua aderência com a superfície do pavimento. Para evitar a derrapagem com certa margem de segurança, o máximo coeficiente de atrito ($f_{\text{at máx}}$) deve ser menor que o limite que corresponde à iminência de derrapagem.

O coeficiente de atrito transversal que caracteriza a aderência entre os pneus e o pavimento na iminência da derrapagem depende de uma série de fatores, dentre as quais os mais importantes são:

- Velocidade do veículo;
- Tipo e condições do pavimento: propriedades como macro e microtextura e presença da lâmina d'água;
- Condições e características do pneu do veículo: pressão, composição da borracha e desgaste.

A velocidade do veículo em trajetória curva que provoca sensação de desconforto nos motoristas tem sido considerada como elemento de controle de projeto para a fixação do coeficiente de atrito máximo em rodovias e vias urbanas (DER/SP, 2006). Os coeficientes de atrito transversal utilizados pelo DNIT (2010a) e pela AASHTO (2011) para a determinação dos raios mínimos de curvas horizontais para vias em geral estão indicados na Tabela 2.4:

Tabela 2.4 - Valores máximos admissíveis de coeficiente de atrito transversal

V (km/h)	f _{at} DNIT (2010a)	f _{at} AASHTO (2011)
30	0,20	0,28
40	0,18	0,23
50	0,16	0,29
60	0,15	0,17
70	0,15	0,15
80	0,14	0,14
90	0,14	0,13
100	0,13	0,12
110	0,12	0,11
120	0,11	-

Fonte: DNIT (2010a) e AASHTO (2011)

2.1.6 Valores de superelevação para raios superiores aos mínimos

A utilização de raios de curva horizontal acima dos raios mínimos causa redução da aceleração centrífuga, e consequentemente a superelevação também diminui com aumento do raio. De acordo com DNER (1999), atual DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes), do ponto de vista da segurança e conforto dos motoristas, a taxa de superelevação a ser adotada é calculada da seguinte forma:

$$e = e_{m\acute{a}x} \cdot \left(\frac{2 \cdot R_{m\acute{i}n}}{R} - \frac{R_{m\acute{i}n}^2}{R^2} \right) \quad (2.4)$$

Sendo:

e: Superelevação (%)

e_{máx}: Superelevação máxima admissível

R_{mín}: Raio mínimo da curva horizontal

R: Raio da curva horizontal

2.2 Espiral de Transição

Como o próprio nome sugere, a espiral de transição tem a principal função de permitir a passagem gradativa de um traçado em tangente para um traçado em curva circular, ou seja, o raio de curvatura da curva de transição varia de um valor infinito no fim da tangente até um valor igual ao raio da curva circular no final da curva de transição. A Figura 2.5 mostra o aspecto da espiral de transição.

Figura 2.5 - Aspecto da espiral de transição

Fonte: Notas de aula da disciplina PTR5725 (2009)

Os tipos de curvas que foram mais utilizados para se efetuar a transição da tangente para a curva circular são:

- Clotóide (espiral de Cornu ou Radióide aos Arcos): apresenta curvatura que cresce linearmente com seu comprimento, foi utilizada por Cornu e Fresnel no estudo de ótica. Também chamada de espiral de Van Leber em homenagem ao engenheiro holandês que a utilizou pela primeira vez em traçados ferroviários.
- Parábola Cúbica: não tem sido empregada em larga escala, por ser locada por coordenadas e não ter desenvolvimento suficiente para distribuição de toda superelevação. Era mais utilizada em ferrovias para raios de curvaturas maiores;

- Senóide: não é utilizada com muita frequência, pois apresenta dificuldade de cálculo e de locação;
- Arcos de Círculos gradualmente ascendentes ou descendentes: apresentam dificuldade de exigir do motorista mudança não contínua de trajetória de transição.
- Lemniscata de Bernouille: utilizado por italianos e ingleses;
- Curva Elástica ou Radióide às Abscissas

A clotóide foi consagrada como a curva mais adequada para que o aumento da aceleração radial do veículo ocorra gradualmente. Isso faz com que a clotóide seja correspondente à trajetória descrita pelo veículo, com uma velocidade constante e o volante girando com velocidade angular constante, sem requerer esforço do motorista e proporcionando uma trajetória mais natural. Além disso, é o tipo que representa maior praticidade em relação ao projeto e à implantação.

Segundo Lee (2000), a inserção da curva de transição entre a tangente e a curva circular pode ser efetuada de três maneiras:

- Transição a raio conservado
- Transição a centro conservado
- Transição a raio e centro conservados

A mais utilizada é a transição a raio conservado, pois tem como vantagem a manutenção do raio da curva circular no valor original desejado, sem alterar a posição das tangentes que se interceptam. Isto implica na necessidade de deslocamento da curva circular para o lado de dentro da concordância, para que se dê o afastamento necessário à acomodação dos ramos da espiral, e consequentemente do deslocamento de dentro da curva, sem causar alteração da qualidade da concordância.

2.2.1 Vantagens do emprego da espiral de transição

As vantagens de utilização de espirais de transição em traçados rodoviários citadas pela AASHTO (2011) são:

a) Aceleração centrífuga

A aceleração radial aumenta ou diminui gradualmente com o uso das curvas de transição, diminuindo a tendência dos veículos de invadir as faixas de tráfego adjacentes e uniformizando a velocidade.

b) Transição da superelevação

A espiral de transição proporciona um trecho para a mudança da superelevação da pista entre a tangente e a seção com superelevação plena na curva circular, resultando em um perfeito equilíbrio entre o crescimento da superelevação e o aumento da aceleração centrífuga.

Em curvas circulares simples, normalmente a transição da superelevação é feita 60% a 70% na tangente, onde o motorista muitas vezes é obrigado a girar o volante em direção oposta à da curva que se aproxima para não invadir a faixa adjacente.

c) Consistência da via/velocidade

Contribui para uma trajetória mais natural de ser seguida (diminui a tendência dos veículos de invadirem as faixas adjacentes) e um traçado consistente e, conseqüentemente, para que a velocidade operacional se mantenha constante quando o volante é girado com velocidade angular constante.

d) Aspecto visual satisfatório

O uso da espiral dá um aspecto mais agradável ao traçado, evitando quebras no início e no fim das curvas e um aspecto ótico satisfatório para o motorista. As Figura 2.6 e Figura 2.7 mostram a diferença entre a curva com e sem espiral de transição.

Figura 2.6 - Curva com espiral de transição

Fonte: AASHTO (2011)

Figura 2.7 - Curva sem espiral de transição

Fonte: AASHTO (2011)

e) Transição da seção com largura normal para seção dotada de superlargura

A superlargura, geralmente utilizada em raios de curvaturas muito pequenos, é um aumento adicional na largura da faixa de rolamento nos trechos curvos com a finalidade de manter a distância mínima entre os veículos e as condições de segurança e conforto dos trechos em tangente. A clotóide proporciona um trecho com transição da largura normal para acomodação da superlargura nas curvas circulares.

2.2.2 Elementos da espiral de transição

Os principais elementos das curvas de transição são representados pelas seguintes variáveis e ilustrados na Figura 2.8:

TE: ponto de passagem da tangente para a espiral

EC: ponto de passagem da espiral para a curva circular

CE: ponto de passagem da curva circular para a espiral

ET: ponto de passagem da espiral para a tangente

L: Comprimento da espiral de transição

AC: ângulo central da curva

I: Deflexão entre tangentes

TT: tangente total

T_L : tangente longa

T_C : tangente curta

X_C : abscissa dos pontos EC e CE

Y_C : ordenada dos pontos EC e CE

q: abscissa do centro da curva circular

p: afastamento da curva circular à tangente

D: desenvolvimento circular

D_c : Corda da curva circular

E: distância externa da curva com clotóide

R: raio da curva circular

S_c : ângulo central da espiral

θ : ângulo central circular

CC: Centro da curva circular

PI: Ponto de Interseção

Figura 2.8 - Elementos das espirais de transição

2.2.3 Equação espontânea da espiral de transição

A curva de transição no ponto TE (Tangente - Espiral) tem raio de curvatura $\rho_0 = \infty$, que diminui gradativamente ao longo do seu comprimento L , até atingir o ponto EC (Espiral - Curva) com valor $\rho_e = R$, igual ao raio da curva circular.

Em planta, considera-se que um veículo tenha se deslocado com velocidade linear constante, a partir do ponto TE até um ponto M qualquer, sendo o comprimento percorrido l , e em perfil, obteve uma altura h . Quando o veículo passa pelo ponto EC, terá percorrido um comprimento L , correspondente ao comprimento total da curva de transição e uma altura em perfil de h_e , conforme a Figura 2.9.

Figura 2.9 – Percurso ao longo da curva de transição

Fonte: Notas de aula da disciplina PTR5725 (2009) – adaptado pela autora

$$\begin{aligned}\frac{h_e}{h} &= \frac{L}{l} \\ \frac{L}{l} &= \frac{\operatorname{tg} \alpha_e}{\operatorname{tg} \alpha} \\ \operatorname{tg} \alpha &= \frac{\operatorname{tg} \alpha_e \cdot l}{L}\end{aligned}\quad (2.5)$$

De acordo com a Figura 2.4, tem-se:

$$\begin{aligned}P \cdot \operatorname{sen} \alpha &= F \cdot \operatorname{cos} \alpha \\ \operatorname{tg} \alpha &= \frac{F}{P} = \frac{\frac{m \cdot v^2}{\rho}}{m \cdot g} = \frac{v^2}{\rho \cdot g}\end{aligned}$$

Então:

$$\frac{v^2}{\rho \cdot g} = \frac{\operatorname{tg} \alpha_e \cdot l}{L}$$

$$l \cdot \rho = \frac{v^2 \cdot L}{tg \alpha_e \cdot g}$$

$$\rho \cdot l = C = constante \quad (2.6)$$

Segundo Lee (2000), para veículos que se deslocam sobre a curva com velocidade linear constante, a equação da curva de transição consiste em se imaginar uma geometria tal que a aceleração centrípeta que atua sobre este veículo varie gradualmente ao longo da curva, desde o valor nulo no ponto TE até atingir o valor máximo no ponto EC.

Assim, em um ponto qualquer M da curva com raio de curvatura ρ , a aceleração centrípeta que atua sobre um veículo se deslocando a velocidade v é dada por:

$$a_M = \frac{v^2}{\rho} \quad (2.7)$$

E a aceleração centrípeta máxima no ponto EC com raio de curvatura R , pode ser expressa por:

$$a_e = \frac{v^2}{R} \quad (2.8)$$

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

$$\frac{a_M}{a_e} = \frac{l}{L}$$

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

$$\rho \cdot l = R \cdot l_e \quad (2.9)$$

A equação geral da espiral é definida pela seguinte forma:

$$A^{n+1} = r \cdot l^n \quad (2.10)$$

Sendo

r : raio da curva em um ponto P genético

l : comprimento da espiral no ponto P genérico medido a partir do ponto de concordância com a tangente

n : parâmetro de forma

Quando $n=1$ obtém-se a equação da clotóide, onde o raio de curvatura em qualquer ponto da espiral varia inversamente com o comprimento da clotóide, como mostra a seguinte equação:

$$A^2 = \rho \cdot l \quad (2.11)$$

Onde:

A : Parâmetro da clotóide

ρ : Raio de curvatura em um ponto qualquer da curva de transição (m)

l : comprimento da clotóide até atingir o ponto considerado (m)

O parâmetro A expressa a taxa de mudança de curvatura ao longo da clotóide:

- Valores elevados de “ A ” expressam taxas suaves de mudança de curvatura
- Valores pequenos de “ A ” expressam taxas acentuadas de mudança de curvatura.

Em clotóides entre curvas circulares reversas, o parâmetro A das duas clotóides deve seguir a seguinte relação:

$$A_1 \leq 1,5 \cdot A_2 \quad (2.12)$$

Onde:

A_1 : parâmetro maior correspondente à clotóide 1

A_2 : parâmetro menor correspondente à clotóide 2

2.2.4 Transição da superelevação ao longo da clotóide

O eixo de rotação é uma linha longitudinal à pista, em torno do qual é feito o giro ao longo do comprimento de transição da superelevação. Normalmente, as rodovias com pista simples e seção transversal coroada apresentam eixo de rotação

coincidente com o eixo da pista (Figura 2.10), resultando em diferenças menores entre rampas do eixo e bordos na transição da superelevação. No entanto, em alguns casos, mostra-se mais vantajoso que o eixo de rotação coincida com um dos bordos (a Figura 2.11 apresenta o eixo de rotação situado no bordo interno).

Em rodovias de pista dupla, o eixo de rotação que determina o ponto de aplicação do greide na seção transversal, posiciona-se de três modos em função da largura do canteiro central, conforme DNIT (2010a):

- Situado no eixo do canteiro central que apresentar largura menor que 7 m;
- Canteiros que apresentam larguras entre 7 m e 12 m, apresentam eixo de rotação para cada pista, no bordo interno adjacente ao canteiro;
- As pistas devem ser tratadas como pistas independentes quando o canteiro apresentar larguras maiores que 12 m, podendo o bordo interno ser adjacente ao canteiro ou no bordo oposto ao canteiro.

Com o objetivo de atingir a superelevação plena adotada na curva circular, o giro da pista em tangente para a curva é efetuada linearmente, em duas etapas:

Transição em tangente: Corresponde à extensão B no trecho entre os pontos I e II, que antecede a espiral de transição (Figura 2.10 e Figura 2.11).

A seção transversal da pista coroada na tangente apresenta declividade que direciona o escoamento da água para fora da pista, ou seja, direciona a água do eixo para os bordos com caimento de $i\%$ (o valor usualmente adotado para esta declividade é de 2%). Assim, a faixa do lado interno da curva já se apresenta no mesmo sentido da superelevação, enquanto a faixa externa terá que passar por um desenvolvimento contrário ao da superelevação até o valor zero.

Para se efetuar a distribuição da superelevação com conforto e segurança, são fixados valores limites para o gradiente relativo longitudinal entre a borda e o eixo. O desenvolvimento da superelevação na tangente ocorre com a mesma taxa de variação adotada para o desenvolvimento ao longo da espiral.

Transição em curva: inicia no ponto II (Tangente-Espiral - TE), conforme a Figura 2.10 e Figura 2.11, terminando no ponto IV onde atinge a declividade com superelevação final $e\%$ a ser mantida constante no trecho circular, direcionada para o bordo interno da curva.

Em trechos com greide mais suave, o ponto II é o local onde risco de hidroplanagem

Figura 2.11 - Transição da superelevação na espiral com eixo de rotação no bordo interno

Fonte: DER/SP (2006) – adaptado pela autora.

Sendo:

e : superelevação na curva circular (%)

i : declividade transversal na tangente (%)

$L=A+B$: comprimento da espiral de transição (m)

Pontos Notáveis:

TE: tangente espiral

EC: espiral circular

CE: circular espiral

ET: espiral tangente

2.2.5 Casos em que é dispensável o uso da curva de transição

O uso da curva de transição se torna dispensável em curvas circulares com raios relativamente grandes, pois deixam de apresentar vantagens e benefícios. A fixação deste raio máximo considera uma taxa mínima admissível de aceleração radial a que ficam submetidos os passageiros de um veículo percorrendo a curva circular, a partir da qual os efeitos da aceleração radial podem ser considerados como insuficientes para assegurar o conforto e a segurança com que os motoristas dirigem seus veículos ao passar de uma trajetória retilínea para uma trajetória curva. Os projetos sob jurisdição do DER/SP (2006) adotam os valores recomendados pela AASHTO (2011).

AASHTO (2011): $a \geq 1,3 \text{ m/s}^2$

$$1,3 \text{ m/s}^2 = \frac{1,3 * 3600^2}{1000} = 16848 \text{ km/h}^2$$

$$R \geq \frac{V^2}{16848}$$

$$R \geq \frac{V^2 \cdot 1000}{16848} \text{ (para que o raio seja em metros)}$$

$$R \geq 0,0594 \cdot V^2 \quad (2.13)$$

DNIT (2010a): $a \geq 0,4 \text{ m/s}^2$

$$0,4 \text{ m/s}^2 = \frac{0,4 * 3600^2}{1000} = 5184 \text{ km/h}^2$$

$$R \geq \frac{V^2}{5184}$$

$$R \geq \frac{V^2 \cdot 1000}{5184} \text{ (para que o raio seja em metros)}$$

$$R \geq 0,193 \cdot V^2 \quad (2.14)$$

Onde:

a: taxa de aceleração radial (m/s^2)

R: raio da curva circular (m)

V: velocidade (km/h)

Na Tabela 2.5 são apresentados os valores calculados dos raios acima dos quais pode ser dispensado o uso das curvas de transição, com velocidades variando de 20 a 130 km/h, de acordo com as taxas mínimas de aceleração radial utilizadas pelos manuais do DNIT (2010a) e AASHTO (2011).

Tabela 2.5 - Valores dos raios acima dos quais podem ser dispensadas curvas de transição

V (km/h)	R (m)	R (m)
	DNIT (2010a)	AASHTO (2011) e DER/SP (2006)
20	24	24
30	170	54
40	300	95
50	500	148
60	700	213
70	950	290
80	1200	379
90	1550	480
100	1900	592
110	2300	716
120	2800	852
130	3250	1003

Fonte: DNIT (2010a) e AASHTO (2011)

A adoção de tal critério justifica-se para esses casos em que a variação da aceleração centrífuga for pequena, pois a espiral de transição praticamente se confundiria com a tangente; além disso, nestas condições o motorista não teria dificuldades em acomodar a trajetória do veículo dentro da faixa de tráfego.

Segundo critérios de segurança e consistência de traçado, Lamm et al. (1999) consideram que é dispensável o uso da curva de transição em uma sequência tangente independente-curva circular para velocidades operacionais e raios de curvaturas indicados na Tabela 2.6:

Tabela 2.6 - Raios mínimos acima dos quais podem ser dispensadas as clotoídes em uma sequencia “tangente independente-curva circular”

VELOCIDADE DE OPERAÇÃO NA TANGENTE			R _{MÍN} DA CURVA CIRCULAR	
V _{85T} < 105	km/h		R _{MÍN} ≥ 800	m
V _{85T} ≥ 105	km/h		R _{MÍN} ≥ 1000	m

Fonte: Lamm et al. (1999)

Fazendo-se uma comparação entre valores dos raios apresentados por DNIT (2010a), AASHTO (2011) e Lamm et al. (2009), conclui-se que a AASHTO (2011) permite dispensar o uso de espirais com raios de curva circular menores.

O uso da espiral é dispensável também em curva com ângulo total de deflexão menor que 10 grados (9°), caso em que o comprimento mínimo da curva circular deve, em termos práticos, ser igual à velocidade de projeto.

O Manual Australiano (AUSTROADS, 2003) estabelece que a curva de transição deixa de ser necessária em trechos onde a velocidade operacional é inferior a 60 km/h e também quando o parâmetro “p” (afastamento da curva circular em relação à tangente) for menor que 0,25m.

3 CRITÉRIOS DE FIXAÇÃO DO COMPRIMENTO DA ESPIRAL DE TRANSIÇÃO

Neste capítulo, serão apresentados os critérios mais frequentemente recomendados nos principais manuais de projeto geométrico para a determinação dos valores mínimos e máximos aceitáveis para o comprimento da espiral de transição, levando em consideração aspectos de conforto, segurança e de natureza estética.

3.1 Comprimento Mínimo das Clotóides

De acordo com as recomendações contidas nos principais manuais de projeto geométrico, o comprimento da curva de transição deverá atender simultaneamente a todos os critérios listados a seguir, sendo desejável a adoção de valores superiores ao valor mínimo determinado.

3.1.1 Critério da taxa máxima admissível de variação da aceleração centrífuga

O valor mínimo do comprimento da espiral que garante conforto e segurança ao motorista é determinado fixando-se uma taxa máxima admissível de variação da aceleração centrífuga ou solavanco transversal.

Assumindo que a velocidade é constante, tem-se:

$$L_{\min} = \frac{(V \cdot 1000/3600)^3}{C \cdot R} - \frac{e \cdot (V \cdot 1000/3600) \cdot g}{C} = \frac{V^3}{(3,6)^3 \cdot C \cdot R} - \frac{e \cdot V \cdot g}{3,6 \cdot C}$$

$$L_{\min} = \frac{V^3}{46,656 \cdot C \cdot R} - \frac{e \cdot V \cdot g}{3,6 \cdot C} \quad (3.1)$$

Onde:

V: Velocidade constante do veículo (km/h)

R: Raio da curva circular (m)

$L_{\min}$: Comprimento mínimo da espiral de transição (m)

g: Aceleração gravitacional (m/s^2)

C: Taxa máxima admissível de variação da aceleração centrífuga (m/s^3)

e: Superelevação (%)

Alguns manuais desconsideram o segundo termo para o cálculo do comprimento mínimo da espiral de transição, pois a redução deste comprimento pelo efeito da superelevação é praticamente desprezível.

O valor recomendado em alguns manuais para a taxa máxima admissível de variação da aceleração radial é:

DNIT (2010a): C é estabelecido em função da velocidade constante do veículo:

$$C = 1,5 - 0,009 \cdot V \quad (3.2)$$

V: Velocidade diretriz (km/h)

AASHTO (2011):

$$C \leq 1,2 \text{ m/s}^3$$

Lamm et al. (1999) considera um valor razoavelmente inferior ao recomendado pela AASHTO (2011):

$$C \leq 0,5 \text{ m/s}^3$$

$$A_{\min} = \sqrt{2 \cdot V^3} \quad (3.3)$$

A norma italiana assume que a taxa máxima admissível de aceleração lateral é igual a $50,4/V$ (m/s^3). Assim, tem-se que:

$$A_{\min} = \sqrt{\frac{0,0214 \cdot V^3}{C}} \text{ e } C_{\max} = \frac{50,4}{V}$$

$$A_{\min} = \sqrt{\frac{0,0214 \cdot V^4}{50,4}}$$

$$A_{\min} = 0,0206 \cdot V^2 \quad (3.4)$$

Nos projetos sob jurisdição do DER/SP (2006), é recomendada a adoção do valor sugerido pela AASHTO/2011 de $1,2 \text{ m/s}^3$. Esta taxa de variação da aceleração centrífuga mede o grau de desconforto do motorista e dos passageiros durante a trajetória na espiral de transição.

3.1.2 Critério do comprimento mínimo absoluto de L

Como valores muito pequenos para o comprimento de transição não tem eficácia prática, os valores mínimos absolutos dos comprimentos de transição da superelevação correspondem ao percurso durante cerca de 2 segundos com a velocidade diretriz da rodovia, conforme Tabela 3.1.

$$L_{\min} = 0,556 \cdot V \quad (3.5)$$

Sendo:

V: velocidade (km/h)

Tabela 3.1 - Comprimentos mínimos absolutos de L

V (km/h)	$L_{\min}$ (m)
30	20
40	25
50	30
60	35
70	40
80	45
90	50
100	55
110	60
120	67
130	72

Fonte: DNIT (2010a) e DER/SP (2006)

A AASHTO (2011) estabelece em seu manual que este tempo de percurso de 2 segundos ao longo da via à velocidade de projeto é um valor desejável para os comprimentos da espiral de transição, uma vez que estudos indicaram que este tempo representa a trajetória natural de transição realizada pela maioria dos motoristas.

Comprimentos de espiral de transição muito diferentes deste comprimento da trajetória natural de transição acabam causando aumento da velocidade lateral e deslocamento na posição lateral do veículo no final da curva de transição, levando o motorista a fazer uma manobra corretiva no volante, que resulta em uma trajetória com curvatura mais acentuada que a da curva circular e um indesejável aumento na demanda de atrito lateral pneu pavimento.

O comprimento maior que o recomendado é considerado aceitável na norma da AASHTO (2011) desde que este seja menor que o máximo admissível para as curvas de transição, além de analisar a possibilidade da superlargura da pista nos trechos em curva.

3.1.3 Critério da Máxima Rampa de Superelevação Admissível

Nas curvas horizontais em que é utilizada a clotoide, é desejável que o comprimento para se efetuar a transição da superelevação seja adotado como o comprimento mínimo da espiral de transição, sendo fixado com base na máxima diferença admissível entre os perfis longitudinais do eixo de rotação e da borda mais afastada da pista.

A diferença entre estes perfis longitudinais, conhecida como gradiente relativo, é limitada em função da velocidade, garantindo conforto e segurança na transição da superelevação, conforme cálculos apresentados a seguir, utilizados por alguns manuais.

3.1.3.1 Expressões apresentadas nas Notas Técnicas do DER/SP (2006) e DNIT (2010a)

O gradiente relativo para rodovias de pista simples, com eixo de rotação no centro da pista são apresentados na Tabela 3.2, que será determinado em função da velocidade de projeto em km/h.

Tabela 3.2 – Gradiente relativo para pista simples com eixo de rotação no centro

V (km/h)	g_r (%)	Taxa
20	0,80	1 : 125
30	0,75	1 : 133
40	0,70	1 : 143
50	0,65	1 : 154
60	0,60	1 : 167
70	0,55	1 : 182
80	0,50	1 : 200
90	0,47	1 : 213
100	0,44	1 : 227
110	0,41	1 : 244
120	0,38	1 : 263
130	0,35	1 : 286

Fonte: AASHTO (2011)

Quando o giro da superelevação ocorre simultaneamente em mais de uma faixa em torno do eixo de rotação ou com eixo de rotação no bordo, a elevação do bordo mais afastado da pista passaria por um giro mais acentuado e a adoção do mesmo cálculo conduziria a valores maiores para o comprimento mínimo de transição da superelevação, muitas vezes impraticáveis. Nessa hipótese, os comprimentos de transição são majorados segundo a Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Fator de majoração para eixo de rotação fora do centro

Número de faixas rotacionadas	Fator de Majoração F_m
1	1,0
2	1,5
3	2,0
4	2,5

Fonte: DNIT (2010a)

Utilizando-se as informações da Tabela 3.2 e da Tabela 3.3, calcula-se o comprimento mínimo da espiral para se efetuar a transição da superelevação:

$$L_{\min \text{ trans super}} = F_m \cdot \frac{l}{g_r} \cdot e \quad (3.6)$$

Onde:

$L_{\min \text{ trans super}}$: Comprimento mínimo de transição da superelevação (m)

F_m : Fator de majoração (adimensional)

l : Largura de uma faixa de rolamento (m)

g_r : Taxa básica de superelevação admissível (%) ou gradiente relativo

e : Superelevação na curva circular (m/m)

Outra fórmula para o cálculo do comprimento mínimo de transição da superelevação no caso do eixo de rotação fora do centro, utilizando g_r da Tabela 3.2, é:

$$L_{\min \text{ trans super}} = \frac{(d + l)}{2 \cdot g_r} \cdot e \quad (3.7)$$

Onde:

d : Distância do eixo de rotação ao bordo mais afastado da pista de rolamento (m)

3.1.3.2 Expressões apresentadas por Projeto Padrão DER/SP (2006) e Austroads (2003)

O desenho de Projeto Padrão de Geometria do DER/SP (2006) – PP-DE-F07/022 apresenta a Tabela 3.4 com os valores dos gradientes relativos para cada quantidade de faixas, em função da velocidade de projeto.

Tabela 3.4 – Gradiente relativo do projeto padrão de geometria

V km/h	Taxa	g _r (%)			
		1 faixa	2 faixas	3 faixas	4 faixas
20	1 : 125	0,80	1,06	1,20	1,28
30	1 : 133	0,75	1,00	1,12	1,20
40	1 : 143	0,70	0,93	1,05	1,12
50	1 : 154	0,65	0,86	0,97	1,04
60	1 : 167	0,60	0,80	0,90	0,96
70	1 : 182	0,55	0,73	0,82	0,88
80	1 : 200	0,50	0,66	0,75	0,80
90	1 : 213	0,47	0,63	0,70	0,75
100	1 : 227	0,44	0,59	0,66	0,70
110	1 : 244	0,41	0,55	0,61	0,66
120	1 : 263	0,38	0,51	0,57	0,61
130	1 : 286	0,35	0,47	0,52	0,56

Fonte: DER/SP (2006)

Segundo o Manual Australiano (AUSTROADS/2003), a máxima diferença entre os perfis longitudinais do eixo de rotação e da borda mais afastada da pista são definidos de acordo com a Tabela 3.5 apresentada na sequência.

Tabela 3.5 – Máximo gradiente relativo

V (km/h)	g _r (%)		
	1 faixa	2 faixas	Mais que 2 faixas
≤ 40	0,9	1,3	1,7
60	0,6	1,0	1,3
80	0,5	0,8	1,0
100	0,4	0,7	0,9
120	0,4	0,6	0,8
130	0,4	0,6	0,8

Fonte: AUSTROADS (2003)

Utilizando a Tabela 3.4 e a Tabela 3.5, a equação que considera g_r para diferentes números de faixa, é:

$$L_{\text{mín trans super}} = N \cdot \frac{l}{g_r} \cdot e \quad (3.8)$$

N: Número de faixas

3.1.4 Critério de fluência ótica

Para que a transição seja opticamente perceptível, a variação angular mínima deve ser de 3,5 grados, cerca de $3^\circ 11'$, segundo Lamm et al. (1999). Desta consideração resulta que o mínimo parâmetro “A” da clotóide deve ser igual a $R/3$.

$$\begin{aligned} S_c \geq 3^\circ 11' &\leftrightarrow S_c \geq \frac{(3 + 11/60) \cdot 2 \cdot \pi}{360} \leftrightarrow \frac{L^2}{2 \cdot A^2} \geq 0,055 \text{ rad} \\ &\leftrightarrow \frac{L^2}{A^2} \geq 2 \cdot 0,055 \text{ rad} \\ &\leftrightarrow \frac{L}{A} \geq \frac{1}{3} \leftrightarrow \frac{L \cdot R}{A \cdot R} \geq \frac{1}{3} \leftrightarrow \frac{A^2}{A \cdot R} \geq \frac{1}{3} \leftrightarrow \end{aligned}$$

$$A \geq \frac{R}{3} \quad (3.9)$$

E com isso, pode-se concluir que:

$$L_{\text{mín3}} = \frac{A^2}{R} = \frac{\left(\frac{R}{3}\right)^2}{R}$$

$$L_{\text{mín3}} = \frac{R}{9} \quad (3.10)$$

Sc: Ângulo de deflexão da clotóide

Segundo o manual do DNIT (2010a), estes raios devem ser grandes, da ordem de 800 e 1000 metros.

3.1.5 Valor mínimo do parâmetro “p”

Considerando-se o critério de percepção visual do motorista e aspectos estéticos e de segurança, o DER/SP (2006) recomenda um valor mínimo para o parâmetro “p”, que corresponde ao afastamento da curva circular em relação à tangente, obtendo um comprimento mínimo da clotóide.

$$p \approx \frac{L^2}{24 \cdot R}$$

$$L_{\min 4} = \sqrt{24 \cdot R \cdot p_{\min}} \quad (3.11)$$

Os valores mínimos do parâmetro “p” que causam comportamento natural de esterção do motorista segundo algumas normas são:

$P \geq 0,2$ m (AASHTO, 2011)

$P \geq 0,25$ m (Lamm et al., 1999 e AUSTROADS, 2003)

$P \geq 0,3$ m (DNIT, 2010a)

$P \geq 0,2$ m (DER/SP, 2006)

3.2 Comprimento Máximo da Clotóide

O comprimento máximo da espiral de transição por sua vez, está condicionado pelos critérios apresentados a seguir:

3.2.1 Critério do máximo ângulo central da clotóide

Para que a curva seja visualmente perceptível, a espiral de transição não deve apresentar comprimento maior que o raio da curva de concordância, o que corresponde a um ângulo central de transição menor ou igual a 28°39’:

$$S_c = \frac{L^2}{2 \cdot A^2} \leftrightarrow \frac{L^2}{2 \cdot L \cdot R} \leq 28^\circ 39'$$

$$\frac{L}{R} \leq 2 \cdot 28^\circ 39' \leftrightarrow \frac{L}{R} \leq 57,3^\circ \leftrightarrow \frac{L}{R} \leq 1 \text{ rad}$$

$$L_{\text{máx1}} = R \quad (3.12)$$

Sc: Ângulo de deflexão da clotóide

L: Comprimento da espiral de transição (m)

R: Raio da curva circular (m)

3.2.2 Critério do tempo de percurso

O comprimento máximo da espiral de transição deve ser limitado pela distância percorrida pelo veículo, por um tempo de 8 segundos:

$$t_{\text{máx}} = 8 \text{ segundos} = \frac{8}{3600} = 0,0022 \text{ horas}$$

$$V = \frac{L}{t} \leftrightarrow L = V \cdot t$$

$$L_{\text{máx2}} = V \cdot 0,0022 \cdot 1000 \text{ m}$$

$$L_{\text{máx2}} = 2,2 \cdot V \quad (3.13)$$

L_{máx}: Valor máximo do comprimento da transição da superelevação (m)

V: Velocidade diretriz (km/h)

t: Tempo (horas)

3.2.3 Valor máximo do parâmetro “p”

O parâmetro “p” de 1,0 m fixado pela AASHTO (2011) e também utilizado pelo DER/SP (2006) estabelece um valor máximo do comprimento de espiral, consistente com o máximo deslocamento lateral que resulta do comportamento natural de

motoristas ao longo da curva de transição.

$$L_{máx3} = \sqrt{24 \cdot R \cdot p_{máx}} \quad (3.14)$$

p: Afastamento da curva circular em relação à tangente (m)

3.3 Modelo de cálculo para o comprimento desejável da clotóide (PERCO, 2005)

Uma pesquisa foi desenvolvida por Perco (2005) com a finalidade de estimar o comprimento desejável da espiral de transição baseado em dados coletados em três diferentes estudos, possibilitando uma descrição do real comportamento do motorista. Resultados mostraram que o comprimento desejável da espiral é igual à distância percorrida durante o tempo de esterção, sendo que o modelo em questão estima esta distância percorrida de acordo com as características geométricas da curva.

Para estudar os efeitos do comprimento da espiral de transição, foi observado o comportamento de esterção dos motoristas na curva, dividindo a simulação do percurso em duas etapas:

- Antes da curva: é a etapa mais importante, que ocorre antes do veículo entrar na curva, onde o motorista usa a informação visual para planejar a trajetória e a manobra a ser feita. Se a trajetória antes de entrar na curva estiver correta, preciso de menos esterção e menos correção de velocidade.
- Depois do início da esterção: o motorista utiliza a informação visual e cinemática para revisar a manobra do veículo e fazer a correção de velocidade, caso haja necessidade.

As espirais de transição muito longas levam a um efeito negativo e percepção enganosa sobre a curva, além de apresentar o tempo de esterção menor que o

tempo de percurso na clotóide, ou seja, a esterção termina ainda dentro da espiral obrigando o motorista a fazer uma correção de esterção e velocidade.

A Tabela 3.6 mostra dados coletados por Perco, em períodos diurnos e com pista seca, a partir de observações com câmera de vídeo digital, efetuadas durante a manobra do motorista em uma curva, para efeito de comparação entre trajetórias com e sem espiral de transição.

Tabela 3.6 - Dados coletados durante a esterção com e sem espiral

	Raio (m)	Super- elevação (%)	Largura pista (m)	Compr. Espiral (m)	Desloc. Lateral (m)	Tempo Esterção (s)	Velocidade Inicial (km/h)	Final (km/h)
Sem Espiral	64	7,0	3,90	-	1,51	2,48	63,2	56,6
	90	5,0	3,85	-	0,90	3,02	64,5	58,6
	225	2,8	3,80	-	0,59	1,95	73,9	74,8
	240	3,3	3,70	-	0,97	2,41	76,0	74,2
	370	5,0	3,75	-	0,32	1,85	78,7	78,8
	400	7,0	3,85	-	0,57	1,76	84,7	81,6
	MÉDIA				0,81	2,25		
Com Espiral	65	5,7	3,75	55,38	1,47	3,11	72,8	62,9
	70	5,8	3,80	157,50	1,06	3,05	64,3	54,0
	250	5,1	3,70	48,40	0,93	2,28	94,5	93,7
	400	4,1	3,85	49,00	0,16	1,23	107,0	106,6
	400	4,1	3,70	182,25	0,28	1,50	98,7	96,7
	MÉDIA				0,78	2,23		

Fonte: Perco (2005)

Analisando-se a Tabela 3.6, pode-se concluir que:

- O deslocamento lateral para a parte interna da curva durante a esterção diminui à medida que aumenta o raio da curva, como ilustra a Figura 3.1;
- A existência da espiral não causou diferença significativa no deslocamento lateral, onde se conclui que a espiral não leva o motorista a seguir trajetória muito próximo ao eixo da pista;

Figura 3.1 – Deslocamento lateral versus raio de curvatura

- A média do deslocamento com a existência de espiral foi de 0,78 m, sendo que na curva circular simples a média foi de 0,81 m;
- Os tempos de esterção observados também mostraram que a presença da espiral de transição não altera o modo de esterção do motorista; a média dos tempos de esterção com a existência da espiral foi de 2,23 segundos e sem a espiral de 2,25 segundos;
- As velocidades observadas mostraram que o uso da clotoide não afeta a taxa de desaceleração.

Observou-se que a taxa de desaceleração acaba sendo muito alta quando a espiral de transição apresenta um comprimento muito grande, causando um efeito negativo, onde a correção necessária de esterção ao longo da espiral requer uma redução maior de velocidade.

O modelo para determinar o comprimento desejável da espiral de transição foi baseado em três equações de regressão, que relacionam o raio da curva com o tempo de esterção, com a velocidade operacional na curva e com a taxa de desaceleração. O raio foi considerado como variável independente, porque é a característica geométrica que tem o efeito mais significativo nas três variáveis dependentes.

3.3.1 Tempo de esterção

A equação utilizada para estimar o tempo de esterção em função do raio de curvatura foi desenvolvida a partir dos dados da Tabela 3.6.

O gráfico da Figura 3.2 mostra o tempo de esterção diminuindo com o aumento do raio, podendo o motorista manter mais ou menos uma velocidade angular constante da esterção do volante, resultando na seguinte equação linear:

$$t_{\text{ester}} = -0,0041 \cdot R + 3,2048 \quad (3.15)$$

$$R^2 = 0,85$$

t_{ester} : Tempo de esterção (s)

R: Raio da curva (m)

R^2 : Coeficiente de determinação

Figura 3.2 – Tempo de esterção versus raio de curvatura

3.3.2 Velocidade operacional

Os dados para a análise da velocidade operacional foram coletados durante o dia, em uma pista seca e somente dos carros que tinham um intervalo de tempo maior

que 5 segundos em relação ao carro da frente. Curvas com raios muito grandes e velocidades também muito grandes foram descartadas da base de dados para aumentar a precisão da equação.

Para que a velocidade operacional na curva não ultrapassasse a velocidade operacional na tangente, a assíntota horizontal foi igualada à velocidade operacional da via de 115 km/h (reta $y=115$).

$$V_{85} = \frac{115}{\left(1 + \frac{75,6375}{R}\right)} \quad (3.16)$$

$$R^2 = 0,80$$

V_{85} : 85º percentil da velocidade (km/h)

R: Raio da curva (m)

R^2 : Coeficiente de determinação

Tabela 3.7 – Velocidades operacionais coletadas em curvas com diferentes raios

R (m)	V_{85} (km/h)	R (m)	V_{85} (km/h)
50	58	400	95
99	61	400	97
100	71	470	95
110	67	470	105
160	77	500	101
240	80	500	115
250	81	600	107
270	83	600	112
280	90	600	115
300	70	625	95
300	76	625	102
320	95	750	115
340	77	750	115
340	85	850	110

Figura 3.3 – Velocidade operacional versus raio de curvatura

3.3.3 Taxa de desaceleração

Para a desaceleração, foram considerados locais com raios pequenos, que causassem uma real redução de velocidade requerida para fazer a curva com segurança. Os dados foram coletados (Tabela 3.8) utilizando-se o radar Light Detection and Ranging (LIDAR), durante o dia e nos locais com pista seca e estão representados graficamente na Figura 3.4.

Tabela 3.8 – Dados coletados em locais com raios pequenos

R (m)	d_{v85} (m/s^2)
20	1,25
50	0,8
51	0,92
52	0,83
75	0,72
75	0,67
100	0,93
120	0,56
122	0,78
148	0,63

170	0,48
175	0,71
200	0,75
220	0,53
245	0,62
280	0,71
315	0,42
515	0,27

Figura 3.4 – Taxa de desaceleração versus raio de curvatura

A equação (3.17) é a equação de regressão obtida com base nos dados coletados.

$$d_{V85} = -0,2217 \cdot \ln(R) + 1,764 \quad (3.17)$$

$$R^2 = 0,73$$

d_{V85} : desaceleração calculada pelo V_{85} (m/s^2)

R: Raio da curva (m)

R^2 : Coeficiente de determinação

3.3.4 Expressão do modelo de Perco (2005)

Considerando-se que a taxa de desaceleração é constante, o comprimento desejável da espiral L_{ester} é igual à distância percorrida durante o tempo

de esterção t_{ester} com uma velocidade constante V_{ester} , que é a velocidade operacional atingida na metade do comprimento Lester:

$$L_{ester} = t_{ester} \cdot V_{ester}$$

A desaceleração acaba exatamente no final da espiral onde a velocidade é a velocidade operacional da curva:

$$\begin{aligned} \frac{L_{ester}}{2} &= \frac{V_{ester}^2 - V_{85}^2}{2 \cdot d_{v85}} \\ V_{ester}^2 - t_{ester} \cdot d_{v85} \cdot V_{ester} - V_{85}^2 &= 0 \\ V_{ester} &= \frac{-t_{ester} \cdot d_{v85} + \sqrt{t_{ester}^2 \cdot d_{v85}^2 - 4 \cdot V_{85}^2}}{2} \end{aligned} \quad (3.18)$$

A Tabela 3.9 mostra o tempo de esterção t_{ester} , a velocidade V_{85} , a taxa de desaceleração d_{v85} , o comprimento desejável da espiral L_{ester} e mostra valores calculados da velocidade operacional média V_{ester} pelas equações anteriores.

Tabela 3.9 - Variáveis calculadas a partir do raio da curva

R (m)	t_{ester} (s)	V_{85} (km/h)	V_{85} (m/s)	d_{v85} (m/s ²)	$t_{ester} \cdot d_{v85}$ -	V_{85}^2 -	V_{ester} (m/s)	V_{ester} (km/h)	L_{ester} (m)
50	3,00	45,77	12,71	0,90	-2,69	-161,62	14,13	50,86	42,37
80	2,88	59,11	16,42	0,79	-2,28	-269,61	17,60	63,35	50,62
120	2,71	70,54	19,59	0,70	-1,90	-383,93	20,57	74,05	55,79
180	2,47	80,97	22,49	0,61	-1,51	-505,93	23,26	83,74	57,37
250	2,18	88,29	24,52	0,54	-1,18	-601,45	25,12	90,43	54,74
340	1,81	94,07	26,13	0,47	-0,85	-682,84	26,56	95,62	48,09
440	1,40	98,13	27,26	0,41	-0,58	-743,03	27,55	99,18	38,58

Na Figura 3.5 são apresentados os raios e os valores calculados de comprimento desejável da espiral de transição na Tabela 3.9. A partir destes pontos, resultou uma equação polinomial (3.19 de Perco (2005)).

Figura 3.5 – Comprimento da espiral versus raio da curvatura

$$L_{ester} = 1,4 \cdot 10^{-6} \cdot R^3 - 0,0014 \cdot R^2 + 0,372 \cdot R + 28,4 \quad (3.19)$$

Este modelo é válido somente para raios entre 50 m e 440 m e rodovias com duas faixas de tráfego, considerando-se que requer uma redução de velocidade garantindo segurança sem precisar de correções de esterção inesperadas.

4 HIDROPLANAGEM

Conforme o objetivo do trabalho, é necessário realizar verificações do comprimento desejável determinado pelo critério do comprimento mínimo absoluto citado no DNIT (2010a). Este corresponde ao valor percorrido em 2 segundos com velocidade de projeto, recomendado pela AASHTO (2011) como o mais desejável. A primeira verificação é baseada no critério da taxa máxima admissível de variação da aceleração centrífuga. Em seguida, é realizada outra verificação em função da máxima rampa de superelevação admissível, que certifica se o comprimento da clotóide é suficiente para efetuar a transição da superelevação. Por fim, a última verificação relaciona-se à hidroplanagem ou aquaplanagem, analisando se o comprimento da espiral definido pelos critérios apresenta ou não o risco deste fenômeno ocorrer.

Segundo Salpico (2009), a hidroplanagem, conhecida também como aquaplanagem, ocorre quando há perda de contato pneu/pavimento em um veículo que trafega sobre uma pista coberta por uma lâmina d'água. Em tal situação, o condutor perde o controle do veículo, pois o aumento da velocidade do veículo dificulta a expulsão da água existente sob os pneus e conseqüentemente acarreta a redução de área de contato pneu/pavimento até a perda total do contato, condição esta que difere do fenômeno da derrapagem.

A hidroplanagem é dividida em três tipos (Bucharles e Fernandes Junior, 2009): viscosa, dinâmica e de borracha revertida. A primeira ocorre quando a lâmina d'água tem centésimos de milímetro, causando efeitos da viscosidade e inércia da água e tornando o revestimento escorregadio, podendo ocorrer em velocidades muito inferiores. A hidroplanagem dinâmica ocorre durante a chuva ou em pontos baixos de pista, com existência de espessa camada de água na superfície do pavimento. Por fim, a hidroplanagem de borracha revertida é um fenômeno mais comum em acidentes aéreos, onde a derrapagem longa gera calor que reverte à vulcanização, tornando o pneu pegajoso.

A Figura 4.1 mostra o contato pneu/pavimento na presença de lâmina d'água sobre o pavimento. Quando a velocidade do veículo é próxima da velocidade crítica de hidroplanagem, a carga do pneu é quase totalmente apoiada sobre a lâmina de

água, reduzindo progressivamente a carga do pneu apoiada sobre o pavimento. Assim que a carga do pneu apoiada sobre o pavimento se anula, ocorre a hidroplanagem total.

Figura 4.1 - Vista do pneu sobre o pavimento

Fonte: Salpico (2009) – adaptado pela autora

Em chuvas intensas, o risco de ocorrência da hidroplanagem aumenta quando a inclinação transversal da pista for próxima de zero, ou seja, quando a diferença de inclinação entre o bordo externo e o eixo de rotação for quase nula por inversão do sentido da superelevação.

A foto a seguir foi retirada de uma apresentação feita por Maria da Conceição de Azevedo, com o tema “Indicadores de Segurança do Estado do Pavimento” que foi realizado no “Fórum de Inovação e Normalização” em Lisboa, e mostra a presença de água na deformação da trilha de roda e em um trecho onde a superelevação aparentemente é próxima de zero.

Figura 4.2 - Trecho com risco de hidroplanagem

Fonte: Azevedo (2010)

Segundo França (1988), não há meios de evitar esta zona crítica de inclinação transversal nula, porém algumas medidas podem ser tomadas para diminuir a ocorrência do fenômeno da hidroplanagem, sendo ponderadas para não afetar a comodidade e o conforto óptico proporcionado pela clotóide. Algumas alterações no traçado da geometria podem minimizar os riscos, tal como a diminuição do comprimento da clotóide, o que consequentemente diminuiria a transição da superelevação, além de estudos de fatores como a espessura da lâmina de água, a rugosidade do revestimento do pavimento, as características do pneu e a velocidade de deslocamento do veículo.

4.1 Cálculo do parâmetro w

Para analisar a possibilidade de ocorrência da hidroplanagem, o parâmetro w , definido como a razão entre o desenvolvimento da linha de escoamento mais desfavorável e a raiz quadrada de sua declividade média, deve ser comparado ao

valor de w crítico. Este estudo foi baseado e adaptado do trabalho realizado por França (1988). O parâmetro “ $w_{\text{crítico}}$ ” é calculado em função da intensidade de chuva, da velocidade e do tipo de pavimento em situações críticas.

$$w = \frac{l_f}{\sqrt{i_f}} \quad (4.1)$$

Onde:

l_f : desenvolvimento das linhas de escoamento (m)

i_f : declividade média segundo a linha de escoamento (%)

Nos trechos em tangente, a determinação do comprimento máximo da linha de escoamento d’água e a sua declividade média é efetuada de maneira simplificada devido à constância da superelevação, ao passo que nos trechos com espirais de transição tal determinação é muito mais complexa. Os vetores ilustrados na Figura 4.3 representam a declividade longitudinal e transversal da pista na tangente, calculados pelas seguintes equações:

$$l_f = \frac{l}{i} \cdot (i^2 + r^2)^{0,5} \quad (4.2)$$

$$i_f = (i^2 + r^2)^{0,5} \quad (4.3)$$

Figura 4.3 - Percurso d’água na tangente

Sendo:

i : Declividade transversal na tangente (%)

l : Largura de uma faixa de rolamento (m)

r : Declividade longitudinal ou greide (%)

O cálculo do percurso da água em curvas com espirais de transição é feito sempre na direção de maior declividade, sendo o desenvolvimento das linhas de escoamento, o resultado da somatória dos vetores de cada iteração e as declividades longitudinal e transversal na zona de transição da superelevação, resultados da média das declividades de cada iteração.

Com o intuito de obter as linhas de escoamento de maior comprimento, o cálculo é acelerado, considerando-se que a situação crítica ocorre quando o escoamento está passando pela superelevação nula no eixo da pista.

Serão apresentados a seguir, dois estudos do percurso d'água (na espiral de entrada – caso 1 e espiral de saída – caso 2, em rampa descendente) utilizando-se esquemas retificados de curva divididos em quatro quadrantes, com um eixo de coordenadas (x,y).

Os cálculos dos comprimentos A e B, que compõe o comprimento total da espiral são apresentados a seguir, utilizando-se para isto, o gráfico da superelevação (Figura 4.4).

Figura 4.4 - Gráfico da superelevação

$$\frac{e}{L} = \frac{i}{B}$$

$$B = \frac{i \cdot L}{e} \quad (4.4)$$

Como: $L = A + B$

Então: $A = L - B \quad (4.5)$

Considerando-se:

L: Desenvolvimento da clotóide (m), sendo $L=A+B$

B: Desenvolvimento na tangente (m)

i: Declividade transversal na tangente (%)

e: Superelevação na curva circular (%)

4.1.1 Percurso da gota d'água no caso 1

O CASO 1 representa uma espiral de entrada em uma rampa descendente com rotação no eixo da pista com superlargura nula, em um pavimento impermeável. A Figura 4.5 mostra como as linhas de fluxo d'água se comportam neste caso durante a chuva, destacando o percurso mais crítico que passa pelo trecho onde a superelevação é próxima de zero.

Figura 4.5 - Linhas de água entrando na curva com uma rampa descendente

Fonte: Salpico (2009) – adaptado pela autora

A declividade do bordo externo é calculada da seguinte forma:

$$\frac{r - (-Pu)}{\frac{N \cdot l}{2}} = \frac{i - e}{A}$$

$$Pu = -r + \frac{N \cdot l \cdot (i - e)}{2 \cdot A} \quad (4.6)$$

Sendo:

l : Largura de uma faixa de rolamento (m)

N : Número de faixas

i : Declividade transversal na tangente (%)

e : Superelevação na curva circular (%)

r : Declividade de perfil longitudinal (%)

P_u : declividade dos bordos (%)

$A = L - B$

A Figura 4.6 apresenta os quatro quadrantes da espiral de transição do CASO 1, destacando também o ponto (0,0), o eixo de coordenadas x e y e o ponto crítico da linha de fluxo d'água durante a chuva.

Figura 4.6 – Quadrantes e eixo de coordenadas da espiral de transição – CASO 1

Para os quadrantes I e II apresentados a seguir, o cálculo da linha de escoamento de maior comprimento inicia-se no ponto (x_0, y_0) e um comprimento Δx é **subtraído** à linha de escoamento, passando por um processo iterativo, terminando quando y for menor que $N \cdot l/2$ (ponto inicial do escoamento da água, o ponto alto da pista coroadada).

Ponto inicial $(x_0, y_0) = (B, N \cdot l)$

$$x = x_{anterior} - \Delta x \quad (4.7)$$

$$y = y_{anterior} - \frac{\Delta x}{Z_1} \cdot Z_2 \quad (4.8)$$

Onde:

Z_1 : Declividade longitudinal

Z_2 : Declividade transversal

1) Quadrante I

$$0 < x \leq B$$

$$N \cdot l/2 < y \leq N \cdot l$$

Figura 4.7 – Quadrante I da espiral de entrada em destaque

$$\frac{r - Z_1}{y - N \cdot l/2} = \frac{r - (-Pu)}{N \cdot l/2}$$

$$Z_1 = r - \frac{r + Pu}{N \cdot l/2} \cdot (y - N \cdot l/2) \quad (4.9)$$

$$\frac{i - Z_2}{x} = \frac{i - 0}{B}$$

$$Z_2 = i - \frac{i}{B} \cdot x \quad (4.10)$$

2) Quadrante II

$$X \leq 0$$

$$N \cdot l/2 < y \leq N \cdot l$$

Figura 4.8 – Quadrante II da espiral de entrada em destaque

$$Z_1 = r \quad (4.11)$$

$$Z_2 = i \quad (4.12)$$

Para os quadrantes III e IV, o cálculo inicia-se novamente no ponto (x_0, y_0) e um comprimento Δx é neste caso, **somado** à linha de escoamento, passando por um processo iterativo, terminando quando y for negativo, ou seja, quando a água sair pelo bordo interno.

Ponto inicial $(x_0, y_0) = (B, N \cdot l)$

$$x = x_{anterior} + \Delta x \quad (4.13)$$

$$y = y_{anterior} + \frac{\Delta x}{Z_1} \cdot Z_2 \quad (4.14)$$

3) Quadrante III

$$B < X \leq 2 \cdot B$$

$$y > 0$$

Figura 4.9 – Quadrante III da espiral de entrada em destaque

Igual aos cálculos do quadrante I

$$Z_1 = r - \frac{r + Pu}{N \cdot l/2} \cdot (y - N \cdot l/2) \quad (4.15)$$

$$Z_2 = i - \frac{i}{B} \cdot x \quad (4.16)$$

4) Quadrante IV

$$x > 2 \cdot B$$

$$y > 0$$

Figura 4.10 – Quadrante IV da espiral de entrada em destaque

$$\frac{r - Z_1}{y - N \cdot l/2} = \frac{r - (-Pu)}{N \cdot l/2}$$

$$Z_1 = r - \frac{r + Pu}{N \cdot l/2} \cdot (y - N \cdot l/2) \quad (4.17)$$

$$\frac{-i - Z_2}{x - 2 \cdot B} = \frac{-i - (-e)}{A}$$

$$Z_2 = - \left(i + \frac{e - i}{A} \cdot (x - 2 \cdot B) \right) \quad (4.18)$$

4.1.2 Percurso da gota d'água no caso 2

O CASO 2, por sua vez, representa uma espiral de saída também em uma rampa descendente com rotação no eixo da pista com superlargura nula, em um pavimento impermeável, como pode ser vista na Figura 4.11. As linhas de fluxo d'água estão representadas nesta espiral de saída, destacando-se o percurso de maior comprimento da água, que passa pelo trecho onde a superelevação é próxima de zero.

Figura 4.11 - Linhas de água saindo da curva com uma rampa descendente

Fonte: Salpico (2009) – adaptado pela autora

A declividade do bordo interno é calculada da seguinte forma:

$$\frac{Pu - r}{\frac{N \cdot l}{2}} = \frac{i - 0}{B}$$

$$Pu = r + \frac{N \cdot l \cdot i}{2 \cdot B} \quad (4.19)$$

A Figura 4.12 apresenta os quatro quadrantes da espiral de transição do CASO 2, destacando também o ponto (0,0), o eixo de coordenadas x e y e o ponto crítico da linha de fluxo d'água durante a chuva.

Figura 4.12 – Quadrantes e eixo de coordenadas da espiral de transição – CASO 2

O cálculo no quadrante I e II inicia-se no ponto (x_0, y_0) e um comprimento Δx é **subtraído** da linha de escoamento, passando por um processo iterativo, terminando quando y for negativo (ponto mais alto, onde se inicia o acúmulo do filme d'água).

Ponto inicial $(x_0, y_0) = (L, \frac{N \cdot l}{2})$

$$x = x_{anterior} - \Delta x \quad (4.20)$$

$$y = y_{anterior} - \frac{\Delta x}{Z_1} \cdot Z_2 \quad (4.21)$$

1) Quadrante I

$$A < x \leq L$$

$$0 < y \leq N \cdot l/2$$

Figura 4.13 – Quadrante I da espiral de saída em destaque

$$\frac{Pu - Z_1}{y} = \frac{Pu - r}{N \cdot l/2}$$

$$Z_1 = Pu + \frac{r - Pu}{N \cdot l/2} \cdot y \quad (4.22)$$

$$\frac{i - Z_2}{x - A} = \frac{i - 0}{B}$$

$$Z_2 = i - \frac{i}{B} \cdot (x - A) \quad (4.23)$$

2) Quadrante II

$$0 < x \leq A$$

$$0 < y \leq N \cdot l/2$$

Figura 4.14 – Quadrante II da espiral de saída em destaque

$$\frac{Pu - Z_1}{y} = \frac{Pu - r}{N \cdot l/2}$$

$$Z_1 = Pu + \frac{r - Pu}{N \cdot l/2} \cdot y \quad (4.24)$$

$$\frac{e - Z_2}{x} = \frac{e - i}{A}$$

$$Z_2 = e - \frac{e - i}{A} \cdot x \quad (4.25)$$

O cálculo no quadrante III e IV inicia-se novamente no ponto (x_o, y_o) e um comprimento Δx é **acrescido** à linha de escoamento, passando por um processo iterativo, terminando quando y for negativo, significando que a água saiu da pista.

Ponto inicial $(x_o, y_o) = (L, N \cdot \frac{l}{2})$

$$x = x_{anterior} + \Delta x \quad (4.26)$$

$$y = y_{anterior} + \frac{\Delta x}{Z_1} \cdot Z_2 \quad (4.27)$$

3) Quadrante III

$$L < x \leq L+B$$

$$y > 0$$

Figura 4.15 – Quadrante III da espiral de saída em destaque

Igual aos cálculos do quadrante I para Z_1

$$Z_1 = Pu + \frac{r - Pu}{N \cdot l/2} \cdot y \quad (4.28)$$

$$\frac{0 - Z_2}{x - L} = \frac{0 - i}{B}$$

$$Z_2 = -\frac{i}{B} \cdot (x - L) \quad (4.29)$$

4) Quadrante IV

$x > L+B$

$y > 0$

Figura 4.16 – Quadrante IV da espiral de saída em destaque

$$Z_1 = r \quad (4.30)$$

$$Z_2 = -i \quad (4.31)$$

O comprimento da linha de escoamento e a sua declividade são calculados da seguinte forma:

$$l_f = \frac{\Delta x}{Z_1} \cdot i_f \quad (4.32)$$

$$i_f = (Z_1^2 + Z_2^2)^{1/2} \quad (4.33)$$

$$l_f \text{ FINAL} = \sum l_f \text{ de cada iteração}$$

$$i_f \text{ FINAL} = \text{média das declividades de cada iteração}$$

Sendo:

l_f : desenvolvimento das linhas de escoamento (m)

i_f : Declividade média segundo a linha de escoamento (%)

A Figura 4.17 mostra um fluxograma com a sequência de estudo do percurso d'água nos dois casos apresentados: da espiral de entrada e de saída em rampa descendente, sendo cada caso dividido em quatro quadrantes, passando por iterações que acabam quando a água sai da pista.

Figura 4.17 – Fluxograma para cálculo do percurso d'água

4.2 Cálculo do parâmetro $w_{\text{crítico}}$

Nos itens adiante, serão apresentados os parâmetros que caracterizam uma situação crítica, a partir da qual se pode verificar um possível aumento do risco de acidentes devido ao efeito da hidroplanagem. De acordo com a Figura 4.18, os fatores que influenciam na hidroplanagem são: intensidade pluviométrica, velocidade do veículo na chuva e o tipo de pavimento. A partir destes dados, calcula-se qual a altura da lâmina d'água crítica que causa a perda do contato pneu/pavimento.

Figura 4.18 – Fluxograma para verificação da existência do risco de hidroplanagem

4.2.1 Seleção da chuva representativa

A publicação que resultou dos estudos desenvolvidos no âmbito do “Convênio DAEE – USP” (1999) teve como foco a análise das precipitações intensas de trinta localidades do Estado de São Paulo.

Os resultados utilizados para a elaboração da equação de chuvas intensas foram obtidos do posto do IAG (Instituto Astronômico e Geofísico da Universidade de São Paulo), localizado no Parque do Estado, na cidade de São Paulo (prefixo E3-035), cujas informações básicas são apresentadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Informações sobre o posto pluviométrico do IAG

Posto/ entidade	Coordenada	Altitude (m)	Autor/ ano do estudo	Dados utilizados	
				Período	Número anos
IAG/DAEE	23°39' S 46°38' W	780	MARTINEZ E MAGNI - 1999	1933- 1997	65

A equação de Martinez e Magni (1999) é válida para durações de chuva maiores ou iguais a 10 minutos e menores ou iguais a 1440 minutos:

$$i_p = 39,3015 \cdot (t + 20)^{-0,9228} + 10,1767 \cdot (t + 20)^{-0,8764} \cdot \left[-0,4653 - 0,8407 \ln \left(\ln \left(\frac{T}{T-1} \right) \right) \right] \quad (4.34)$$

Onde:

i_p : intensidade de precipitação (mm/min)

t: Duração da chuva (minutos)

T: Período de retorno (anos)

Utilizando-se esta equação, foram calculadas e apresentadas na Tabela 4.2, as intensidades de precipitação (em milímetros por hora), para período de retorno de 2 a 200 anos:

Tabela 4.2 - Previsão de máximas intensidades de chuvas em São Paulo (mm/h)

Duração t (minutos)	Período de retorno T (anos)		
	2	5	10
10	97,44	127,28	147,04
20	74,67	97,86	113,22
30	60,74	79,82	92,44
60	39,32	51,96	60,32
120	23,43	31,17	36,29
180	16,84	22,50	26,25
360	9,30	12,53	14,66
720	5,02	6,82	8,01
1080	3,48	4,75	5,59

Deve-se salientar que uma intensidade de chuva muito elevada poderia causar uma sensação de perigo e uma perda de visibilidade, o que levaria o condutor a uma redução de velocidade. A classificação de chuva (ASSIS et al., 1996 apud SORIANO et al., 2002) que se apresenta na Tabela 4.3 possibilita a escolha de uma intensidade de chuva elevada, mas que não seja suficiente para causar uma redução de velocidade.

Tabela 4.3 - Classificação da intensidade de precipitação

Intervalo de Precipitação (mm)	Classificação
0,1 a 5	Muito fraca
5 a 10	Fraca
10 a 15	Moderadamente fraca
15 a 20	Moderada
20 a 25	Moderadamente forte
25 a 30	Forte
>30	Muito forte

Fonte: Soriano (2002)

4.2.2 Velocidade crítica para ocorrência da hidroplanagem e altura da lâmina d'água

A altura da lâmina d'água acima do topo das rugosidades é calculada por Chesterton (2006) e por França (1988) através das equações de velocidade, definindo uma situação crítica na iminência de ocorrer a hidroplanagem.

Para espessuras de lâminas d'água acima do topo da rugosidade com valores menores que 2,413 mm, utiliza-se a equação de Agrawal (FRANÇA, 1988), que resultou de 1.038 casos de início de hidroplanagem. A Tabela 4.4 mostra resultados das velocidades de acordo com a equação de Agrawal:

$$V = 96,899 \times h^{-0,259} \quad (4.35)$$

Sendo:

V: Velocidade crítica do veículo para ocorrência da hidroplanagem(km/h)

h: Altura crítica da lâmina de água acima do topo da rugosidade do pavimento (mm)

Tabela 4.4 – Velocidades utilizando equação de Agrawall

h (mm)	V (km/h)
0,1	175,922
0,2	147,012
0,3	132,356
0,4	122,853
0,5	115,954
0,6	110,606
0,7	106,277
0,8	102,664
0,9	99,580
1,0	96,899
1,1	94,536
1,2	92,430
1,3	90,533
1,4	88,812
1,5	87,239
1,6	85,793
1,7	84,456
1,8	83,215
1,9	82,058
2,0	80,975
2,1	79,958
2,2	79,001
2,3	78,097
2,413	77,132

Caso a altura da lâmina d'água seja maior que 2,413 mm, utiliza-se a equação de velocidade de Gallaway (CHESTERTON, 2006):

$$V = 0,9143 \cdot SD^{0,04} \cdot P_t^{0,3} \cdot (TD + 0,794)^{0,06} \times A \quad (4.36)$$

Onde:

V: Velocidade do veículo (km/h)

SD: Velocidade spin down - perda de aderência = 10% no início da hidroplanagem

P_t : Pressão de enchimento dos pneus (kPa)

TD: Ranhuras dos pneus (mm)

A é o maior valor das duas equações abaixo:

$$A_I = \frac{12,639}{h^{0,06}} + 3,507$$

$$A_{II} = \left(\frac{22,351}{h^{0,06}} - 4,970 \right) \times (H/S)^{0,14}$$

h: Altura crítica da lâmina de água acima do topo da rugosidade do pavimento (mm)

H/S: Altura da areia do respectivo ensaio (mm)

Considerando-se que foram utilizados veículos apresentando os valores de SD, P_t , TD e H/S indicados, a Tabela 4.5 mostra resultados dos valores da velocidade em função da altura da lâmina d'água:

SD = 10%

P_t = 165 kPa

TD = 2,4 mm

H/S = 0,508 mm

Tabela 4.5 – Velocidades utilizando equação de Gallaway

h (mm)	A_I	A_{II}	Maior Valor (A_I ou A_{II})	V (km/h)
2,413	15,490	14,753	15,490	77,054
2,5	15,470	14,720	15,470	76,927
2,6	15,442	14,675	15,442	76,788
2,7	15,415	14,632	15,415	76,653
2,8	15,389	14,590	15,389	76,524
2,9	15,364	14,550	15,364	76,400
3,0	15,340	14,511	15,340	76,280
3,1	15,316	14,474	15,316	76,165
3,2	15,294	14,437	15,294	76,053
3,3	15,272	14,402	15,272	75,945
3,4	15,251	14,369	15,251	75,840
3,5	15,231	14,336	15,231	75,739
3,6	15,211	14,304	15,211	75,640
3,7	15,192	14,273	15,192	75,544
3,8	15,173	14,243	15,173	75,452
3,9	15,155	14,214	15,155	75,361
4,0	15,137	14,185	15,137	75,273
4,1	15,120	14,158	15,120	75,188
4,2	15,103	14,131	15,103	75,104
4,3	15,087	14,104	15,087	75,023
4,4	15,071	14,079	15,071	74,944
4,5	15,055	14,054	15,055	74,866
4,6	15,040	14,029	15,040	74,790
4,7	15,025	14,005	15,025	74,716

A Figura 4.19 mostra o gráfico das equações de Agrawall para altura de lâmina d'água menor que 2,413 mm e de Gallaway para valores de h maiores que 2,413 mm.

Figura 4.19 - Gráfico das equações de Agrawall e Gallaway

Com o aumento da velocidade, há uma redução do atrito pneu/pavimento dificultando a expulsão da água causando a hidroplanagem. Portanto, velocidades muito baixas não são relevantes para o estudo; sendo assim, o intervalo de velocidade a verificar a existência do risco de hidroplanagem será entre 80 e 110 km/h, pois o condutor irá manter o seu veículo em condições ruins de visibilidade em condições climáticas adversas. A velocidade máxima adotada foi definida imaginando-se que o motorista não precise reduzi-la mesmo em más condições e, portanto, somente motoristas imprudentes ultrapassariam a velocidade de 110 km/h, face à intensidade de chuva. Ademais, a velocidade deve ser menor que a velocidade operacional.

Para calcular a altura da lâmina d'água acima do topo das rugosidades na iminência de ocorrer a hidroplanagem com a velocidade escolhida, é utilizada a equação de velocidade de Agrawall (FRANÇA, 1988), pois de acordo com a Figura 4.19, esta

equação é utilizada para velocidades maiores que 80 km/h.

$$V = 96,899 \times h^{-0,259}$$

$$h = \left(\frac{V}{96,899} \right)^{-3,861} \quad (4.37)$$

Sendo:

V: velocidade (km/h)

h: altura da lâmina de água acima do topo da rugosidade do pavimento (mm)

Outro método para determinar a profundidade média da textura da superfície é através do ensaio da Mancha de Areia, padronizado de acordo com a ASTM E 965-96, avaliando a macrotextura do pavimento. Com o auxílio de um dispositivo apropriado, é espalhado um volume conhecido de material (areia fina ou esferas de vidro) sobre a superfície do pavimento em forma circular. A profundidade média das ranhuras da superfície da camada de desgaste é determinada conhecendo-se o diâmetro do círculo obtido, medindo-se o tamanho da mancha em quatro direções e fazendo a média.

$$h_m = \frac{4 \cdot V}{d_m^2 \cdot \pi} \quad (4.38)$$

Sendo:

h_m : altura média de areia (mm)

V: volume do material espalhado (25.000 mm³)

d_m : diâmetro médio do círculo de mancha na superfície do pavimento (mm)

Por último, o método mais utilizado que avalia a microtextura do pavimento é o “Pêndulo Britânico”, de acordo com a norma ASTM E 303-93. O equipamento avalia as propriedades do atrito superficial do pavimento através de um braço pendular com uma sapata de borracha deslizando.

4.2.3 Tipo do pavimento

Para o cálculo do w crítico, levou-se em consideração a rugosidade da superfície do pavimento em quatro casos distintos com combinações entre micro e macrotextura (França, 1988), onde:

h : altura da lâmina d'água acima do topo das rugosidades (m)

ε_1 : altura das rugosidades do pavimento (mm)

α : ângulo das rugosidades

n_i : número de saliências por metro de largura do escoamento

l_f : desenvolvimento das linhas de escoamento (m)

C_e : coeficiente de escoamento

i_f : declividade média segundo a linha de escoamento (%)

K : coeficiente de rugosidade - Manning ($m^{1/3}/s$)

i_p : intensidade de precipitação ($m^3/m^2 \cdot s$)

Será considerada uma possível permeabilidade do pavimento, dependendo do material a ser utilizado e do seu impacto para o cálculo da espessura da lâmina d'água sobre a superfície do pavimento.

4.2.3.1 Macrorrugosidade e microrrugosidade elevadas

O primeiro caso a ser estudado é o de um tratamento superficial betuminoso rugoso, que está esquematizado através de triângulos, conforme ilustrado na Figura 4.20:

Figura 4.20 - Modelo teórico do tratamento superficial betuminoso rugoso

Número de saliências por metro de largura do escoamento

$$\tan \frac{\alpha}{2} = \frac{b/2}{\varepsilon_1} \leftrightarrow b = 2 \cdot \tan \frac{\alpha}{2} \cdot \varepsilon_1$$

$$\cos \frac{\alpha}{2} = \frac{\varepsilon_1}{c} \leftrightarrow c = \frac{\varepsilon_1}{\cos \frac{\alpha}{2}}$$

$$1m = n_1 \cdot b \leftrightarrow n_1 = \frac{1}{b} = \frac{1}{2 \cdot \tan \frac{\alpha}{2} \cdot \varepsilon_1}$$

Figura 4.21 - Área molhada de um triângulo e de todo o canal

Área de cada canal

$$\Delta = \frac{b \cdot \varepsilon_1}{2} = \frac{2 \cdot \tan \frac{\alpha}{2} \cdot \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_1}{2} = \tan \frac{\alpha}{2} \cdot \varepsilon_1^2$$

Área de todo canal

$$\Delta \cdot n_1 = \tan \frac{\alpha}{2} \cdot \varepsilon_1^2 \cdot \frac{1}{2 \cdot \tan \frac{\alpha}{2} \cdot \varepsilon_1} = \frac{\varepsilon_1}{2}$$

Seção molhada

$$S = h \cdot 1 + \frac{\varepsilon_1}{2}$$

Perímetro molhado

$$X = n_1 \cdot 2 \cdot \frac{\varepsilon_1}{\cos \frac{\alpha}{2}} = \frac{1}{2 \cdot \tan \frac{\alpha}{2} \cdot \varepsilon_1} \cdot 2 \cdot \frac{\varepsilon_1}{\cos \frac{\alpha}{2}} = \frac{1}{\sin \frac{\alpha}{2}}$$

Raio Hidráulico

$$Rh = \frac{S}{X} = \frac{h \cdot 1 + \frac{\varepsilon_1}{2}}{\frac{1}{\sin \alpha/2}} = \sin \alpha/2 \cdot \left(h + \frac{\varepsilon_1}{2}\right)$$

Vazão

$$Q = l_f \cdot i_p \quad \text{se } Ce = 1$$

$$Q = K \cdot S \cdot Rh^{2/3} \cdot i_f^{1/2}$$

$$l_f \cdot i_p = K \cdot S \cdot Rh^{2/3} \cdot i_f^{1/2} = K \cdot \left(h + \frac{\varepsilon_1}{2}\right) \cdot \left[\sin \alpha/2 \cdot \left(h + \frac{\varepsilon_1}{2}\right)\right]^{2/3} \cdot i_f^{1/2}$$

$$\frac{l_f \cdot i_p}{K \cdot (\sin \alpha/2)^{2/3} \cdot i_f^{1/2}} = \left(h + \frac{\varepsilon_1}{2}\right)^{5/3}$$

$$w_{\text{crítico}} = \frac{l_f}{\sqrt{i_f}} = \frac{\left(h + \frac{\varepsilon_1}{2}\right)^{5/3} \cdot K \cdot (\sin \alpha/2)^{2/3}}{i_p} \quad (4.39)$$

4.2.3.2 Macrorrugosidade elevada e microrrugosidade baixa

Os triângulos que representavam a macrotextura do item anterior foram substituídos por semicircunferências, representando um tratamento superficial betuminoso liso.

Figura 4.22 - Modelo teórico do tratamento superficial betuminoso liso

Número de saliências por metro de largura do escoamento

$$b = 2 \cdot \varepsilon_1$$

$$1m = n_1 \cdot b \leftrightarrow n_1 = \frac{1}{b} = \frac{1}{2 \cdot \varepsilon_1}$$

Figura 4.23 - Área molhada de um canal e de todo o canal

Área de cada canal

$$\Delta = \varepsilon_1 \cdot 2 \cdot \varepsilon_1 - \frac{\pi \cdot \varepsilon_1^2}{4} = 2 \cdot \varepsilon_1^2 - \frac{\pi \cdot \varepsilon_1^2}{4} = \varepsilon_1^2 \cdot \left(2 - \frac{\pi}{2}\right)$$

Área de todo canal

$$\Delta \cdot n_1 = \varepsilon_1^2 \cdot \left(2 - \frac{\pi}{2}\right) \cdot \frac{1}{2 \cdot \varepsilon_1} = \varepsilon_1 \cdot \left(1 - \frac{\pi}{4}\right)$$

Seção molhada

$$S = h \cdot 1 + \varepsilon_1 \cdot \left(1 - \frac{\pi}{4}\right)$$

Perímetro molhado

$$X = n_1 \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_1}{2} = \frac{1}{2 \cdot \varepsilon_1} \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_1}{2} = \frac{\pi}{2}$$

Raio Hidráulico

$$Rh = \frac{S}{X} = \frac{h + \varepsilon_1 \cdot \left(1 - \frac{\pi}{4}\right)}{\frac{\pi}{2}} = \left[h + \varepsilon_1 \cdot \left(1 - \frac{\pi}{4}\right)\right] \cdot \frac{2}{\pi}$$

Vazão

$$Q = l_f \cdot i_p \quad \text{se } Ce = 1$$

$$Q = K \cdot S \cdot Rh^{2/3} \cdot i_f^{1/2}$$

$$l_f \cdot i_p = K \cdot S \cdot Rh^{2/3} \cdot i_f^{1/2}$$

$$l_f \cdot i_p = K \cdot \left[h + \varepsilon_1 \cdot \left(1 - \frac{\pi}{4}\right)\right] \cdot \left[\left[h + \varepsilon_1 \cdot \left(1 - \frac{\pi}{4}\right)\right] \cdot \frac{2}{\pi}\right]^{2/3} \cdot i_f^{1/2}$$

$$l_f \cdot i_p = K \cdot \left[h + \varepsilon_1 \cdot \left(1 - \frac{\pi}{4} \right) \right] \cdot \left[h + \varepsilon_1 \cdot \left(1 - \frac{\pi}{4} \right) \right]^{2/3} \cdot \left(\frac{2}{\pi} \right)^{2/3} \cdot i_f^{1/2}$$

$$\frac{l_f \cdot i_p}{K \cdot \left(\frac{2}{\pi} \right)^{2/3} \cdot i_f^{1/2}} = \left[h + \varepsilon_1 \cdot \left(1 - \frac{\pi}{4} \right) \right]^{5/3}$$

$$w_{crítico} = \frac{l_f}{\sqrt{i_f}} = \frac{\left[h + \varepsilon_1 \cdot \left(1 - \frac{\pi}{4} \right) \right]^{5/3} \cdot K \cdot \left(\frac{2}{\pi} \right)^{2/3}}{i_p} \quad (4.40)$$

4.2.3.3 Macrorrugosidade baixa e microrrugosidade elevada

O modelo teórico utilizado para este revestimento de concreto asfáltico rugoso (CPA) é o mesmo utilizado para macrotextura e microrrugosidade elevadas, sendo assim, o parâmetro w crítico é calculado pela mesma expressão:

$$w_{crítico} = \frac{l_f}{\sqrt{i_f}} = \frac{\left(h + \frac{\varepsilon_1}{2} \right)^{5/3} \cdot K \cdot (\sin \alpha / 2)^{2/3}}{i_p} \quad (4.41)$$

4.2.3.4 Macrorrugosidade e microrrugosidade baixas

Neste último caso, o concreto asfáltico liso apresenta valor de raio hidráulico igual à altura da lâmina d'água acima do tipo das rugosidades, sendo representada pela seguinte fórmula:

$$w_{crítico} = \frac{l_f}{\sqrt{i_f}} = \frac{\left(h + \frac{\varepsilon_1}{2} \right)^{5/3} \cdot K}{i_p} \quad (4.42)$$

4.3 Análise do risco da hidroplanagem

A sequência deste estudo de hidroplanagem se resume da forma apresentada a seguir:

- Cálculo do parâmetro w :
  - Cálculo do comprimento da linha de escoamento mais desfavorável
  - Declividade média da linha de escoamento mais desfavorável
  - w : razão entre este comprimento e a raiz quadrada da declividade
- Cálculo do parâmetro w crítico:
  - Seleção da chuva representativa
  - Velocidade do veículo em uma pista molhada
  - Cálculo da altura da lâmina d'água acima das rugosidades na iminência de ocorrer a hidroplanagem
  - Escolha do tipo do pavimento

Se w ultrapassar o valor de w crítico, será verificada a existência do risco de hidroplanagem.

5 ESTUDO DE CASO

5.1 Considerações Iniciais

Este capítulo contempla o estudo de caso com o objetivo de definir o comprimento da espiral de transição, que deverá atender aos critérios apresentados no Capítulo 3. O comprimento desejável da espiral de transição será calculado de acordo com o tempo de percurso de 2 segundos ao longo da espiral, recomendado pela AASHTO (2011).

Em seguida, o comprimento definido será analisado quanto ao critério da taxa máxima admissível de variação da aceleração centrífuga, critério da máxima rampa de superelevação admissível e por fim, quanto ao fenômeno da hidroplanagem, conforme Capítulo 4.

Para isso, será utilizada planilha do Microsoft Excel®, onde serão inseridos os critérios citados no trabalho, de forma a possibilitar a simulação de diferentes situações, tornando-se uma ferramenta de trabalho para facilitar a determinação e verificação do comprimento desejável da espiral de transição. Esta planilha serviria como apoio para decisão no projeto, visando um desempenho mais adequado, possibilitando simulações com diferentes critérios e diferentes características geométricas: raio, largura da pista, velocidade, ponto de aplicação do greide, superelevação, declividade longitudinal, etc.

5.2 Dados de entrada

Os parâmetros definidos inicialmente serão velocidade de projeto e máxima superelevação admissível. O máximo fator de atrito lateral entre o pneu e o pavimento será definido em função da velocidade de projeto, conforme Tabela 2.4.

Com os dados de projeto definidos, pode-se calcular o raio mínimo utilizando-se a equação (5.1, verificando-se com isto, se o raio escolhido está acima do raio mínimo.

$$R_{\min} = \frac{V^2}{127 \cdot (e_{\max} + f_{at\max})} \quad (5.1)$$

Após verificar se o raio de curvatura horizontal é maior que o raio mínimo calculado, a superelevação é calculada pela equação (5.2, por onde se pode concluir que este valor é descendente em função do raio.

$$e = e_{\max} \cdot \left(\frac{2 \cdot R_{\min}}{R} - \frac{R_{\min}^2}{R^2} \right) \quad (5.2)$$

No item 2.2.5, a Tabela 2.5 apresenta valores dos raios acima dos quais podem ser dispensadas as curvas de transição, verificando se há necessidade ou não do uso da espiral (utilizaram-se valores recomendados pelo DNIT/2011)

Com superelevação máxima de 8%, a Tabela 5.1 mostra um exemplo com as velocidades de projeto variando entre 80 e 120 km/h e variando também os valores dos raios da curva horizontal para cada velocidade, a fim de verificar se o raio é maior que o raio mínimo e se é dispensável o uso da espiral de acordo com o item 2.2.5.

Onde:

V: Velocidade de projeto (km/h)

$e_{\max}$: Superelevação máxima (%)

$f_{at\max}$: Coeficiente de atrito lateral pneu/pavimento

R: Raio da curva circular (m)

$R_{\min}$: Raio mínimo da curva (m)

e: Superelevação na curva (%)

Tabela 5.1 - Dados iniciais necessários para cálculo do comprimento da espiral

V (km/h)	$e_{\max}$ (%)	f_{at} máx	R (m)	R mín (m)	Verifica R	e (%)	Precisa de espiral?
80	8%	0,14	400	229	OK	6,54%	SIM
80	8%	0,14	600	229	OK	4,94%	SIM
80	8%	0,14	800	229	OK	3,93%	SIM
80	8%	0,14	1.000	229	OK	3,25%	SIM
90	8%	0,14	400	290	OK	7,39%	SIM
90	8%	0,14	600	290	OK	5,86%	SIM
90	8%	0,14	800	290	OK	4,75%	SIM
90	8%	0,14	1.000	290	OK	3,97%	SIM
100	8%	0,13	400	375	OK	7,97%	SIM
100	8%	0,13	600	375	OK	6,87%	SIM
100	8%	0,13	800	375	OK	5,74%	SIM
100	8%	0,13	1.000	375	OK	4,87%	SIM
110	8%	0,12	600	476	OK	7,66%	SIM
110	8%	0,12	700	476	OK	7,18%	SIM
110	8%	0,12	800	476	OK	6,69%	SIM
110	8%	0,12	900	476	OK	6,23%	SIM
120	8%	0,11	1.000	597	OK	6,70%	SIM
120	8%	0,11	1.200	597	OK	5,98%	SIM
120	8%	0,11	1.300	597	OK	5,66%	SIM
120	8%	0,11	1.400	597	OK	5,37%	SIM

5.3 Valores-limite para comprimento da espiral de transição

O comprimento da espiral de transição deve ser analisado levando-se em consideração os critérios apresentados no Capítulo 3, garantindo conforto, segurança e percepção visual do motorista.

5.3.1 Critérios para comprimento mínimo da clotóide

Os valores mínimos do comprimento da clotóide devem atender aos seguintes critérios:

- Critério da taxa máxima admissível de variação da aceleração centrífuga, de acordo com DNIT (2010a):

$$L_1\text{mín} = \frac{V^3}{46,656 \cdot C \cdot R} - \frac{e \cdot V \cdot g}{3,6 \cdot C} \quad C = 1,5 - 0,009 \cdot V$$

- Critério do comprimento mínimo $L_2\text{mín}$ absoluto de L, correspondente ao percurso durante cerca de 2 segundos com velocidade diretriz da rodovia.
- Critério da máxima rampa de superelevação admissível

$$L_3\text{mín} = F_m \cdot \frac{l}{g_r} \cdot e$$

- Critério de fluência ótica:

$$L_4\text{mín} = \frac{R}{9}$$

- Valor mínimo do parâmetro “p”: o manual do DNIT (2010a) propõe que p seja maior ou igual a 0,3 m.

$$L_5\text{mín} = \sqrt{24 \cdot R \cdot p_{\text{mín}}}$$

Utilizando os dados apresentados na Tabela 5.1, são calculados na Tabela 5.2 os mínimos comprimentos da espiral de transição para as velocidades de projeto entre 80 e 120 km/h e superelevação máxima de 8%:

Tabela 5.2 – Comprimentos mínimos da espiral de transição

DADOS			MÍNIMOS						
V (km/h)	R (m)	C (m/s ³)	L ₁ mín (m)	L ₂ mín (m)	L ₃ mín (m) p/ 1 faixa	L ₃ mín (m) p/ 2 faixa	L ₃ mín (m) p/ 3 faixa	L ₄ mín (m)	L ₅ mín (m)
80	400	0,78	16,92	44,44	47,08	70,62	94,16	44,44	53,67
80	600	0,78	9,65	44,44	35,58	53,38	71,17	66,67	65,73
80	800	0,78	6,63	44,44	28,26	42,39	56,53	88,89	75,89
80	1000	0,78	5,01	44,44	23,37	35,05	46,73	111,11	84,85
90	400	0,69	30,36	50,00	56,63	84,95	113,27	44,44	53,67
90	600	0,69	16,92	50,00	44,91	67,36	89,82	66,67	65,73
90	800	0,69	11,45	50,00	36,36	54,55	72,73	88,89	75,89
90	1000	0,69	8,56	50,00	30,38	45,57	60,76	111,11	84,85
100	400	0,60	53,15	55,56	65,20	97,80	130,40	44,44	53,67
100	600	0,60	28,35	55,56	56,25	84,37	112,49	66,67	65,73
100	800	0,60	18,60	55,56	46,98	70,47	93,95	88,89	75,89
100	1000	0,60	13,61	55,56	39,88	59,82	79,77	111,11	84,85
110	600	0,51	48,25	61,11	67,26	100,89	134,52	66,67	65,73
110	700	0,51	37,73	61,11	63,08	94,61	126,15	77,78	70,99
110	800	0,51	30,64	61,11	58,75	88,12	117,50	88,89	75,89
110	900	0,51	25,59	61,11	54,68	82,02	109,36	100,00	80,50
120	1000	0,42	36,08	66,67	63,47	95,20	126,93	111,11	84,85
120	1200	0,42	26,99	66,67	56,64	84,96	113,27	133,33	92,95
120	1300	0,42	23,82	66,67	53,61	80,42	107,22	144,44	96,75
120	1400	0,42	21,25	66,67	50,84	76,26	101,68	155,56	100,40

5.3.2 Critério para comprimento máximo da clotóide

Os critérios recomendados pelos manuais para comprimento máximo da espiral de transição são:

- Critério do máximo ângulo central da clotóide

$$L_1\text{máx} = R$$

- Critério do tempo de percurso em 8 segundos

$$L_2\text{máx} = 2,2 \cdot V$$

São calculados os máximos comprimentos da espiral de transição para velocidades de projeto entre 80 e 120 km/h e superelevação máxima de 8%, na Tabela 5.3:

Tabela 5.3 – Comprimentos máximos da espiral de transição

DADOS		MÁXIMOS		
V (km/h)	R (m)	L ₁ máx (m)	L ₂ máx (m)	L ₃ máx (m)
80	400	400,00	176,00	97,98
80	600	600,00	176,00	120,00
80	800	800,00	176,00	138,56
80	1.000	1000,00	176,00	154,92
90	400	400,00	198,00	97,98
90	600	600,00	198,00	120,00
90	800	800,00	198,00	138,56
90	1.000	1000,00	198,00	154,92
100	400	400,00	220,00	97,98
100	600	600,00	220,00	120,00
100	800	800,00	220,00	138,56
100	1.000	1000,00	220,00	154,92
110	600	600,00	242,00	120,00
110	700	700,00	242,00	129,61
110	800	800,00	242,00	138,56
110	900	900,00	242,00	146,97
120	1.000	1000,00	264,00	154,92
120	1.200	1200,00	264,00	169,71
120	1.300	1300,00	264,00	176,64
120	1.400	1400,00	264,00	183,30

5.4 Definição do comprimento da clotóide

O comprimento da espiral de transição é considerado desejável quando este resulta em uma trajetória natural de transição realizada pela maioria dos motoristas que, segundo a AASHTO (2011), corresponde a um tempo de percurso de 2 segundos com velocidade de projeto.

Estudos realizados por Perco (2005) mostraram que o comprimento desejável da espiral é igual à distância percorrida durante o tempo de esterção, resultando em uma média de 2,23 segundos, segundo a Tabela 3.6.

A equação polinomial (5.3) de Perco (2005) é válida somente para raios entre 50 m e 440 m e estima o comprimento desejável da espiral de transição (Tabela 5.4).

$$L_{ester} = 1,4 \cdot 10^{-6} \cdot R^3 - 0,0014 \cdot R^2 + 0,372 \cdot R + 28,4 \quad (5.3)$$

Tabela 5.4 – Comprimentos da espiral calculados pela equação de Perco (2005)

R (m)	L (m)
50,00	43,68
100,00	53,00
150,00	57,43
200,00	58,00
250,00	55,78
300,00	51,80
350,00	47,13
400,00	42,80
440,00	40,30

A Tabela 5.5 apresenta as principais características técnicas de três curvas objetos do estudo, onde foram calculados os comprimentos desejáveis da espiral de transição pelo critério dos 2 segundos (AASHTO, 2011) e também pelo modelo de Perco (2005), sendo este aplicado somente para curvas 1 e 2.

Tabela 5.5 – Características das três curvas

		CURVA	1	2	3
DADOS	Classe de projeto		I-B	I	0
	Faixas		1*3,6 (bidirecional)	2*3,6	3*3,6
	Eixo de rotação		Centro da pista - coroada	Bordo interno	Bordo interno
	Sentido da curva		Direita	Esquerda	Esquerda
	Relevo		Ondulado	Ondulado	Ondulado
	V (km/h)		80	90	100
	$e_{\text{máx}}$		8%	8%	8%
	$f_{\text{at Max}}$		0,14	0,14	0,13
	R (m)		400	400	600
	$R_{\text{mín}}$ (m)		229	290	375
CALCULADO	Verificação do R		OK	OK	OK
	e		6,54%	7,39%	6,87%
	Precisa de Espiral?		SIM	SIM	SIM
L ESPIRAL	$L_{\text{mín2}}$ – Desejável (m)		44,44	50,00	55,56
	L Perco (m)		42,80	42,80	-

Os comprimentos das espirais de transição calculados por Perco (2005) resultaram em valores menores, se comparados aos valores desejáveis adotados pela AASHTO (2011). No entanto, como esta diferença é muito pequena e a média do tempo de esterção do modelo de Perco (2005) é aproximadamente 2 segundos, foi considerado apenas o critério da AASHTO (2011) para definir o comprimento da espiral.

A Tabela 5.6 apresenta os valores de comprimento mínimo da espiral de transição das três curvas em estudo, retirados da Tabela 5.2.

Tabela 5.6 – Comprimentos mínimos das três curvas

Curva	V (km/h)	R (m)	$L_{\min 1}$ (m)	$L_{\min 2}$ (m)	$L_{\min 3}$ (m)
1	80	400	16,92	44,44	47,08 (Para 1 faixa)
2	90	400	30,36	50,00	84,95 (Para 2 faixas)
3	100	600	28,35	55,56	112,49 (Para 3 faixas)

5.4.1 Análise quanto à taxa máxima admissível da variação da aceleração centrífuga

Para garantir o conforto do motorista e dos passageiros durante a trajetória na espiral de transição, o comprimento desejável da espiral ($L_{\min 2}$) deve ser maior que o comprimento mínimo $L_{\min 1}$ definido pela taxa máxima admissível de variação da aceleração centrífuga (C em m/s^3) ou solavanco transversal, estabelecido em função da velocidade constante do veículo, conforme o item 3.1.1.

Conforme a Tabela 5.6, nas três curvas em estudo, o comprimento desejável está atendendo a este critério, calculado segundo o manual do DNIT (2010a).

5.4.2 Análise quanto à máxima rampa de superelevação admissível

É recomendável que o comprimento da clotóide seja suficiente para se efetuar a transição da superelevação, sendo fixado com base na máxima diferença admissível entre os perfis longitudinais do eixo de rotação e da borda mais afastada. Porém, a Tabela 5.6 e os cálculos detalhados a seguir mostram que o comprimento fixado com base nos 2 segundos de tempo de percurso ao longo da via é menor que o comprimento mínimo $L_{\min 3}$ nas três curvas.

Para a curva 1, considerou-se uma pista bidirecional com faixas de rolamento de 3,60 m, seção coroada e eixo de rotação no centro da pista, enquanto a curva 2 são duas faixas de 3,60 m por pista e a curva 3 com três faixas de 3,60 m por pista,

ambas com caimento de 2% na tangente, eixo de rotação no bordo interno.

$$L_{\min trans super} = F_m \cdot \frac{l}{g_r} \cdot e$$

$$\text{CURVA 1: } L_{\min 3} = 1 \cdot \frac{3,6\text{m}}{0,50\%} \cdot 6,54\% = 47,09 \text{ m} > L_{\text{desejável}} = 44,44 \text{ m}$$

$$\text{CURVA 2: } L_{\min 3} = 1,5 \cdot \frac{3,6\text{m}}{0,47\%} \cdot 7,39\% = 84,95 \text{ m} > L_{\text{desejável}} = 50,00 \text{ m}$$

$$\text{CURVA 3: } L_{\min 3} = 2 \cdot \frac{3,6\text{m}}{0,44\%} \cdot 6,87\% = 112,49 \text{ m} > L_{\text{desejável}} = 55,56 \text{ m}$$

O comprimento desejável definido para a curva 1 é menor que o comprimento necessário para realizar a transição da superelevação. Neste caso, para que a superelevação plena na curva circular seja alcançada no final da espiral, parte da variação da superelevação ocorrerá na tangente. Ou seja, arredondando o comprimento desejável para 45,00 metros, serão ainda necessários um pouco mais de 2 metros para a transição da superelevação a serem realizadas na tangente, obrigando o motorista a girar ligeiramente o volante no sentido contrário ao da curva à sua frente. Esta situação é equivalente a uma situação onde a variação da superelevação é feita sem a curva de transição, dispondo-se de 60% a 70% do comprimento da transição na tangente que precede o PC – ponto de início da curva (DNIT, 2010a).

Para as curvas 2 e 3, o comprimento desejável é muito menor que o comprimento necessário para a transição da superelevação. Nestes casos, é prudente aumentar o comprimento da clotóide da curva 2 para 85,00 metros e da curva 3 para 112 m, possibilitando acomodar a variação da superelevação ao longo da clotóide. No entanto, este aumento do comprimento pode gerar aumento do risco de hidroplanagem. Na curva 2 também poderá ser adotado o procedimento de se fazer a transição da superelevação, parte ocorrendo na tangente.

5.4.3 Análise da hidroplanagem

5.4.3.1 Cálculo do parâmetro w

Com a superelevação “e” calculada e o comprimento “L” da espiral de transição definido, obtêm-se os valores dos dois trechos “A” e “B” da clotóide, considerando a declividade da pista “i” de 2% na tangente.

$$B = \frac{i \cdot L}{e}$$

$$A = L - B$$

A curva 1 para direita é composta por uma espiral de entrada, (percurso da gota d’água no CASO 1) e as curvas 2 e 3 (para esquerda), são espirais de saída (CASO 2), todas em declividade “r” descendente de 1% com rotação no eixo da pista com superlargura nula, calculando-se a declividade “Pu” dos bordos.

$$Pu = -r + \frac{N \cdot l \cdot (i - e)}{2 \cdot A}$$

Por um método iterativo, o cálculo do percurso mais crítico da linha de escoamento é feito a cada 10 cm na abscissa, resultando na somatória dos comprimentos da linha de escoamento e na média das declividades de cada iteração. No Apêndice A, constam os cálculos da linha de escoamento realizados no Excel® para a curvas 1 nos quadrantes 1 e 2, e no Apêndice B, estão os cálculos dos quadrantes 3 e 4. O parâmetro w é calculado pela equação a seguir:

$$w = \frac{l_f}{\sqrt{i_f}}$$

Curva 1:

Caso 1: espiral de entrada

Ponto inicial (x_0 ; y_0) = (B ; $2 \cdot l$) = (13,76; 7,20)

A Figura 5.1 mostra o percurso da gota d’água, resultante dos cálculos iterativos (quadrantes 1 e 2 em azul e quadrantes 3 e 4 em vermelho):

Figura 5.1 – Percurso da gota d'água nos quatro quadrantes da curva 1 (Caso 1)

Curva 2:

Caso 2: espiral de saída

Ponto inicial $(x_0; y_0) = (L; N \cdot l) = (85; 7,2)$

A Figura 5.2 mostra o percurso da gota d'água da curva 2 (quadrantes 1 e 2 em azul e quadrantes 3 e 4 em vermelho):

Figura 5.2 – Percurso da gota d'água nos quatro quadrantes da curva 2 (Caso 2)

Curva 3:

Caso 2: espiral de saída

Ponto inicial $(x_0; y_0) = (L; N \cdot l) = (112; 10,8)$

Figura 5.3 – Percurso da gota d'água nos quatro quadrantes da curva 3 (Caso 3)

Os parâmetros w das curvas 1, 2 e 3 foram calculados e apresentados na Tabela 5.7:

Tabela 5.7 – Cálculo do parâmetro w

CURVA	1	2	3
e	6,54%	7,39%	6,87%
i	2,00%	2,00%	2,00%
L (m)	45,00	85,00	112,00
A (m)	31,24	62,00	79,39
B (m)	13,76	23,00	32,61
$N.I$ (m)	3,6	$2 \cdot 3,6$	$3 \cdot 3,6$
r	1,00%	1,00%	1,00%
P_u	-1,52%	1,63%	1,66%
L_w total (m)	21,92	33,33	49,18
i_w média	1,53%	1,41%	1,43%
w	177,42	280,90	410,96

5.4.3.2 Cálculo do parâmetro w crítico

Inicialmente, deve-se selecionar a intensidade de precipitação que melhor representa a região em estudo, em uma condição em que o veículo não seja obrigado a reduzir velocidade por causa de uma chuva intensa que causaria

problemas de visibilidade. Para os estudos, foram utilizadas intensidade de precipitação igual a 23,43 mm/h.

Como as velocidades das curvas são 80, 90 e 100 km/h, através da equação de Agrawall pode-se calcular a altura da lâmina d'água acima do topo da rugosidade do pavimento:

$$\text{CURVA 1: } h = \left(\frac{v}{96,899} \right)^{-3,861} = \left(\frac{80}{96,899} \right)^{-3,861} = 2,10 \text{ mm}$$

$$\text{CURVA 2: } h = \left(\frac{v}{96,899} \right)^{-3,861} = \left(\frac{90}{96,899} \right)^{-3,861} = 1,33 \text{ mm}$$

$$\text{CURVA 3: } h = \left(\frac{v}{96,899} \right)^{-3,861} = \left(\frac{100}{96,899} \right)^{-3,861} = 0,89 \text{ mm}$$

Para os diferentes tipos de pavimentos, consegue-se calcular o $w_{\text{crítico}}$, que caracteriza a situação crítica de ocorrência da hidroplanagem.

1) Macro e microrrugosidade elevadas – revestimento asfáltico rugoso

$$w_{\text{crítico}} = \frac{l_f}{\sqrt{i_f}} = \frac{\left(h + \frac{\varepsilon_1}{2} \right)^{5/3} \cdot K \cdot (\sin \alpha/2)^{2/3}}{i_p}$$

$$w_{\text{crítico}} = \frac{l_f}{\sqrt{i_f}} = \frac{\left(h + \frac{0,005}{2} \right)^{5/3} \cdot 60 \cdot (\sin 60/2)^{2/3}}{i_p}$$

$$w_{\text{crítico}} = 37,798 \cdot \frac{(h + 0,0025)^{5/3}}{i_p}$$

Onde:

h : altura da lâmina d'água (m)

i_p : intensidade de precipitação ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)

$$\text{CURVA 1: } w_{\text{crítico}} = 37,798 \cdot \frac{(2,10 \cdot 10^{-3} + 0,0025)^{5/3} \cdot 3,6 \cdot 10^6}{23,43} = 737,78$$

$$\text{CURVA 2: } w_{\text{crítico}} = 37,798 \cdot \frac{(1,33 \cdot 10^{-3} + 0,0025)^{5/3} \cdot 3,6 \cdot 10^6}{23,43} = 544,49$$

$$\text{CURVA 3: } w_{\text{crítico}} = 37,798 \cdot \frac{(0,89 \cdot 10^{-3} + 0,0025)^{5/3} \cdot 3,6 \cdot 10^6}{23,43} = 443,30$$

2) Macrorrugosidade elevada e microrrugosidade baixa – revestimento asfáltico liso

$$w_{crítico} = \frac{l_f}{\sqrt{i_f}} = \frac{\left[h + \varepsilon_1 \cdot \left(1 - \frac{\pi}{4}\right)\right]^{5/3} \cdot K \cdot \left(\frac{2}{\pi}\right)^{2/3}}{i_p}$$

$$w_{crítico} = \frac{l_f}{\sqrt{i_f}} = \frac{\left[h + 0,0045 \cdot \left(1 - \frac{\pi}{4}\right)\right]^{5/3} \cdot 80 \cdot \left(\frac{2}{\pi}\right)^{2/3}}{i_p}$$

$$w_{crítico} = 59,203 \cdot \frac{[h + 0,00096]^{5/3}}{i_p}$$

Onde:

h: altura da lâmina d'água (m)

$$\text{CURVA 1: } w_{crítico} = 59,203 \cdot \frac{[2,10 \cdot 10^{-3} + 0,00096]^{5/3} \cdot 3,6 \cdot 10^6}{23,43} = 587,17$$

$$\text{CURVA 2: } w_{crítico} = 59,203 \cdot \frac{[1,33 \cdot 10^{-3} + 0,00096]^{5/3} \cdot 3,6 \cdot 10^6}{23,43} = 363,41$$

$$\text{CURVA 3: } w_{crítico} = 59,203 \cdot \frac{[0,89 \cdot 10^{-3} + 0,00096]^{5/3} \cdot 3,6 \cdot 10^6}{23,43} = 253,88$$

3) Macrorrugosidade baixa e microrrugosidade elevada – revestimento de concreto asfáltico rugoso

$$w_{crítico} = \frac{l_f}{\sqrt{i_f}} = \frac{\left(h + \frac{\varepsilon_1}{2}\right)^{5/3} \cdot K \cdot (\sin \alpha / 2)^{2/3}}{i_p}$$

$$w_{crítico} = \frac{l_f}{\sqrt{i_f}} = \frac{\left(h + \frac{0,0024}{2}\right)^{5/3} \cdot 60 \cdot (\sin 100 / 2)^{2/3}}{i_p}$$

$$w_{crítico} = 50,233 \cdot \frac{(h + 0,0012)^{5/3}}{i_p}$$

Onde:

h: altura da lâmina d'água (m)

i_p : intensidade de precipitação ($m^3/m^2 \cdot s$)

$$\text{CURVA 1: } w_{crítico} = 50,233 \cdot \frac{(2,10 \cdot 10^{-3} + 0,0012)^{5/3} \cdot 3,6 \cdot 10^6}{23,43} = 563,36$$

$$\text{CURVA 2: } w_{crítico} = 50,233 \cdot \frac{(1,33 \cdot 10^{-3} + 0,0012)^{5/3} \cdot 3,6 \cdot 10^6}{23,43} = 362,56$$

$$\text{CURVA 3: } w_{\text{crítico}} = 50,233 \cdot \frac{(0,89 \cdot 10^{-3} + 0,0012)^{5/3} \cdot 3,6 \cdot 10^6}{23,43} = 262,74$$

4) Macro e microrrugosidade baixas – revestimento de concreto asfáltico liso

$$w_{\text{crítico}} = \frac{l_f}{\sqrt{i_f}} = \frac{\left(h + \frac{\varepsilon_1}{2}\right)^{5/3} \cdot K}{i_p}$$

$$w_{\text{crítico}} = 80 \cdot \frac{\left(h + \frac{0,0002}{2}\right)^{5/3}}{i_p}$$

Onde:

h: altura da lâmina d'água (m)

i_p : intensidade de precipitação ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)

$$\text{CURVA 1: } w_{\text{crítico}} = 80 \cdot \frac{\left(2,10 \cdot 10^{-3} + \frac{0,0002}{2}\right)^{5/3} \cdot 3,6 \cdot 10^6}{23,43} = 455,97$$

$$\text{CURVA 2: } w_{\text{crítico}} = 80 \cdot \frac{\left(1,33 \cdot 10^{-3} + \frac{0,0002}{2}\right)^{5/3} \cdot 3,6 \cdot 10^6}{23,43} = 223,10$$

$$\text{CURVA 3: } w_{\text{crítico}} = 80 \cdot \frac{\left(0,89 \cdot 10^{-3} + \frac{0,0002}{2}\right)^{5/3} \cdot 3,6 \cdot 10^6}{23,43} = 119,96$$

Os valores de w críticos calculados são utilizados no item a seguir para verificar se existe o risco de hidroplanagem.

5.4.3.3 Resultados da hidroplanagem

No estudo dos quatro tipos diferentes de pavimento em termos de rugosidade da superfície do pavimento, o revestimento superficial asfáltico rugoso é o caso que apresenta menores riscos, apresentando valor do w crítico muito alto. Por outro lado, o concreto asfáltico liso apresenta w crítico muito baixo, não garantindo a segurança para o condutor, devido ao desgaste do pavimento. O revestimento asfáltico liso e concreto asfáltico rugoso apresentaram w crítico com valores semelhantes e intermediários.

Na Tabela 5.8 estão destacadas as situações onde não ocorre risco de hidroplanagem, ou seja, quando o parâmetro w de hidroplanagem resulta em um

valor menor que o w crítico. Desta forma, se o resultado da razão entre o w de cada curva e o w crítico indicado na tabela for maior que 1, significa a ocorrência de hidroplanagem.

Tabela 5.8 – Resumo do parâmetro w crítico das curvas para cada pavimento

		CURVA	CURVA	CURVA
		1	2	3
Pavimento				
w / w crítico	Revestimento asfáltico rugoso	0,24	0,52	0,93
	Revestimento asfáltico liso	0,30	0,77	1,62
	Revest. de concreto asfáltico rugoso	0,31	0,77	1,56
	Revest. de concreto asfáltico liso	0,39	1,26	3,43

Nas condições de velocidade e intensidade de chuva estudadas, a curva 1 não apresentou risco de hidroplanagem para nenhum tipo de pavimento, no entanto, a curva 3 não apresentou risco de ocorrer a hidroplanagem apenas no revestimento asfáltico rugoso. Na curva 2, apesar do aumento do comprimento da espiral de transição devido à insuficiência na variação da superelevação, somente o revestimento de concreto asfáltico liso apresentou risco de ocorrer hidroplanagem.

5.5 Simulações com diferentes parâmetros

5.5.1 Comprimento mínimo para transição da superelevação

A determinação do comprimento da clotóide necessário para se efetuar a transição da superelevação consiste em limitar a diferença entre os perfis longitudinais do eixo de rotação e da borda mais afastada da pista. O cálculo depende da quantidade de faixas de tráfego, local do eixo da pista e da velocidade, sendo que, velocidades maiores levam a necessidade de maiores comprimentos.

Foram feitas simulações variando-se o raio para duas classes de projeto (IB e 0) citadas no estudo de caso, com velocidades respectivamente de 80 e 100 km/h e

ambas com superelevação máxima de 8%.

Os comprimentos mínimos da espiral de transição para a classe de projeto IB estão na Tabela 5.9 onde, por exemplo, para um raio de 300 m e uma faixa de tráfego de 3,6 m, tem-se:

- Comprimento segundo critérios da taxa máxima admissível de variação da aceleração centrífuga ($L_{\min 1}$): 25,81 m
- Comprimento mínimo absoluto ou desejável ($L_{\min 2}$): 44,44 m
- Comprimento mínimo para transição da superelevação ($L_{\min 3}$): 54,38 m

Portanto, neste caso, o comprimento da clotóide é estabelecido pelo critério da variação da superelevação ($L_{\min 3}$), pois é o maior comprimento mínimo. Para raios maiores que 450 m, o critério que prevalece é o do comprimento mínimo absoluto ($L_{\min 2}$), ou seja, o comprimento desejável é o percorrido em 2 segundos.

Tabela 5.9 – Comprimentos mínimos para Classe IB, velocidade 80 km/h e $e_{\max}$ 8%

R (m)	e (%)	$L_{\min 1}$ (m)	$L_{\min 2}$ (m)	$L_{\min 3}$ (m) p/ 1 faixa
300	7,55%	25,81	44,44	54,38
350	7,04%	20,53	44,44	50,72
400	6,54%	16,92	44,44	47,08
450	6,07%	14,31	44,44	43,72
500	5,65%	12,36	44,44	40,69
550	5,28%	10,85	44,44	37,99
600	4,94%	9,65	44,44	35,58
650	4,64%	8,68	44,44	33,44
700	4,38%	7,87	44,44	31,53
750	4,14%	7,20	44,44	29,81

Para velocidade de 100 km/h, raios maiores que 450 m e menores que 1.200 m têm comprimentos da espiral de transição definido pelo $L_{\min 3}$, critério da transição da superelevação. (Tabela 5.10).

Tabela 5.10 – Comprimentos mínimos para Classe 0, velocidade 100 km/h e $e_{\text{máx}}$ 8%

R (m)	e (%)	$L_{\text{mín1}}$ (m)	$L_{\text{mín2}}$ (m)	$L_{\text{mín3}}$ (m) p/ 3 faixas
450	7,78%	44,10	55,00	127,27
500	7,50%	37,42	55,00	122,72
550	7,19%	32,33	55,00	117,65
600	6,87%	28,35	55,00	112,49
650	6,57%	25,16	55,00	107,47
700	6,28%	22,56	55,00	102,68
750	6,00%	20,41	55,00	98,17
800	5,74%	18,60	55,00	93,95
850	5,50%	17,07	55,00	90,02
1.000	4,87%	13,61	55,00	79,77
1.200	4,22%	10,63	55,00	69,03
1.400	3,03%	11,78	55,00	49,52
1.600	2,71%	10,05	55,00	44,27
1.800	2,44%	8,75	55,00	40,01

5.5.2 Hidroplanagem em pista simples

1ª simulação: variação do comprimento da espiral

No estudo de caso, conclui-se que na curva 1 não existe risco de ocorrer a hidroplanagem, entretanto, será calculado a partir de qual comprimento esta curva, nas mesmas condições de velocidade (80 km/h), declividade longitudinal (1,0%) e intensidade de chuva (23,43 mm/h), passa a apresentar problemas de hidroplanagem, lembrando-se que o comprimento não deve ser maior que 176,00 m. Na Tabela 5.11, calculou-se o parâmetro w para valores de comprimentos de espiral entre 45 e 175 m e concluiu-se que não existe risco de hidroplanagem para estas situações (comparando com os w críticos calculados na Tabela 5.8).

Tabela 5.11 – Valores do parâmetro w para diferentes comprimentos da clotóide

L (m)	lw total (m)	iw	w
45	21,92	1,53%	177,42
60	23,88	1,39%	202,22
80	26,47	1,30%	232,53
100	28,76	1,24%	258,60
120	30,91	1,20%	282,50
140	32,80	1,17%	303,36
160	34,75	1,15%	324,32
175	35,91	1,14%	337,09

2ª simulação: variação da declividade longitudinal

Na simulação anterior, utilizaram-se diversos valores de comprimento da espiral de transição, possibilitando definir a partir de qual comprimento, passaria a existir o risco de hidroplanagem. Nesta 2ª simulação, foi feito um estudo com as mesmas características técnicas da curva 1 do estudo de caso, alterando apenas a declividade longitudinal para analisar o risco de hidroplanagem. No pior caso, que seria o comprimento da espiral de 175 metros, uma redução no greide longitudinal para 0,50% não levou a alterações significativas do parâmetro w, concluindo que o risco de hidroplanagem continua sendo inexistente para os quatro tipos de pavimentos.

Tabela 5.12 – Variação do parâmetro w em função da declividade longitudinal r% para L=175 m

r	W
1,00%	337,09
0,80%	339,17
0,60%	339,84
0,50%	342,90

O gráfico da Figura 5.4 mostra a variação do parâmetro w a partir da Tabela 5.13, em função do aumento do comprimento da espiral de transição, para diferentes declividades longitudinais.

Tabela 5.13 – Comprimento da espiral versus parâmetro w (curva 1)

L espiral (m)	Parâmetro w	
	r%	
	0,50	1,00
45	206,40	177,42
60	209,90	202,22
80	237,33	232,53
100	263,24	258,60
120	285,98	282,50
140	307,10	303,36
160	328,85	324,32
175	342,90	337,09

Figura 5.4 – Comprimento da Espiral (m) X Parâmetro w (curva 1)

Concluiu-se que as declividades longitudinais de 0,5% e 1,0% não apresentaram valores de w muito diferentes e resultaram em valores menores que o w crítico, não causando hidroplanagem.

3ª simulação: comparação entre espiral de entrada e espiral de saída

Como no estudo de caso a curva 1 foi calculada em uma espiral de entrada, definida como CASO 1, será feita uma comparação desta curva, com as mesmas características técnicas, em uma espiral de saída.

	Entrada	Saída
L (m)	45	
e	6,54%	
i	2%	
r	1%	
lw	21,92	17,69
iw	1,53%	1,34%
w	177,42	152,68

A espiral de entrada apresenta o parâmetro de hidroplanagem “w” maior que a espiral de saída, concluindo-se que a possibilidade de ocorrer este fenômeno é ligeiramente maior na espiral de entrada, pois o percurso da gota d’água é maior que na saída.

5.5.3 Hidroplanagem em pista dupla

1ª simulação: Variação do comprimento da espiral

Conforme o estudo de caso, como a curva 3 apresentou riscos de hidroplanagem nas condições exposta em três tipos de pavimentos (não houve risco de hidroplanagem somente em revestimento asfáltico rugoso), serão feitos cálculos para determinar qual comprimento da espiral não causaria hidroplanagem nos outros revestimentos, nas mesmas condições de velocidade, intensidade de chuva, declividade longitudinal e superelevação.

Como o risco de hidroplanagem é menor para comprimentos de espiral menores, foi calculado o parâmetro w para comprimento $L_{\min 2}$ de 55 m, resultando em $w = 299,73$, não alterando a situação, ou seja, ainda com risco de ocorrer o fenômeno da hidroplanagem (utilizando a Tabela 5.8).

2ª simulação: variação da declividade longitudinal

Ainda considerando o comprimento da espiral de 55 m, para que não ocorra hidroplanagem nestas condições de chuva e 100 km/h de velocidade, uma solução seria o aumento da declividade longitudinal para 3,0%. Entretanto a redução do parâmetro w para 289,31 ainda não é suficiente para que não ocorra hidroplanagem. Verificam-se esses valores na Tabela 5.14 e na Figura 5.5.

Esta simulação foi feita para comprimento da espiral $L_{\min 2}$ (55,00 m), o que significa que este comprimento não é suficiente para realizar a transição da superelevação.

Tabela 5.14 - Comprimento da espiral versus parâmetro w (curva 3)

L (m) espiral	Parâmetro w			
	$r\%$			
	0,50	1,00	2,00	3,00
55	306,56	299,73	290,23	289,31
60	319,74	312,4	300,54	299,22
80	364,63	354,36	341,26	336,84
100	404,24	390,41	378,22	371,51
112	426,36	410,96	397,65	391,5

Figura 5.5 – Comprimento da Espiral (m) X Parâmetro w (curva 3)

3ª simulação: variação da velocidade

Outra alternativa seria um cálculo para determinar qual é a velocidade crítica de

hidroplanagem para a curva 3, com o comprimento da espiral de 112 m (comprimento da espiral de que alterado de 55 m para 112 m no item 5.4.2, após análise quanto à máxima rampa de superelevação admissível) e mesma intensidade de chuva considerados no estudo de caso. Esta velocidade crítica é a velocidade na iminência do veículo perder o contato pneu/pavimento na presença de lâmina d'água sobre o pavimento.

A curva 3 no estudo de caso apresentou valor de parâmetro w igual a 410,96 (Tabela 5.7), com comprimento de espiral 112 m, superelevação 6,87% e declividade longitudinal de 1,0% com 3 faixas de 3,6 m. Para que esta curva não apresente riscos de hidroplanagem, w crítico deverá ser maior que 410,96:

- Revestimento asfáltico rugoso:

$$w_{crítico} = 37,798 \cdot \frac{(h + 0,0025)^{5/3}}{i_p} > 410,96 \Leftrightarrow$$

$$h > \left(\frac{410,96 \cdot 23,43}{3,6 \cdot 10^6 \cdot 37,798} \right)^{3/5} - 0,0025$$

$$h > 0,74 \text{ mm}$$

$$h = \left(\frac{V}{96,899} \right)^{-3,861} > 0,74$$

$$V < 0,74^{\frac{1}{-3,861}} \cdot 96,899$$

$$V < 104,94 \text{ km/h}$$

- Revestimento asfáltico liso

$$w_{crítico} = 59,203 \cdot \frac{[h + 0,00096]^{5/3}}{i_p} > 410,96 \Leftrightarrow$$

$$h > \left(\frac{410,96 \cdot 23,43}{3,6 \cdot 10^6 \cdot 59,203} \right)^{3/5} - 0,00096$$

$$h > 1,51 \text{ mm}$$

$$h = \left(\frac{V}{96,899} \right)^{-3,861} > 1,51$$

$$V < 1,51^{\frac{1}{-3,861}} \cdot 96,899$$

$$V < 87,15 \text{ km/h}$$

- Revestimento de concreto asfáltico rugoso:

$$w_{crítico} = 50,233 \cdot \frac{(h + 0,0012)^{5/3}}{i_p} > 410,96 \Leftrightarrow$$

$$h > \left(\frac{410,96 \cdot 23,43}{3,6 \cdot 10^6 \cdot 50,233} \right)^{3/5} - 0,0012$$

$$h > 1,53 \text{ mm}$$

$$h = \left(\frac{V}{96,899} \right)^{-3,861} > 1,53$$

$$V < 1,53^{\frac{1}{-3,861}} \cdot 96,899$$

$$V < 86,83 \text{ km/h}$$

- Revestimento de concreto asfáltico liso:

$$w_{crítico} = 80 \cdot \frac{\left(h + \frac{0,0002}{2} \right)^{5/3}}{i_p} > 410,96 \Leftrightarrow$$

$$h > \left(\frac{410,96 \cdot 23,43}{3,6 \cdot 10^6 \cdot 80} \right)^{3/5} - 0,0001$$

$$h > 1,96 \text{ mm}$$

$$h = \left(\frac{V}{96,899} \right)^{-3,861} > 1,96$$

$$V < 1,96^{\frac{1}{-3,861}} \cdot 96,899$$

$$V < 81,37 \text{ km/h}$$

Para a curva 3 do estudo de caso, em um revestimento asfáltico liso, a velocidade crítica de hidroplanagem calculada foi de 87,15 km/h e no revestimento de concreto asfáltico rugoso, o risco de hidroplanagem é inexistente enquanto a velocidade for menor que 86,83 km/h.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A espiral de transição, também conhecida como clotóide, espiral de Van der Leber, espiral de Cornu ou Radióide aos Arcos, é utilizada entre a tangente e a curva circular, variando o raio de curvatura suavemente do raio infinito da reta até um valor igual ao raio da curva circular. O seu emprego proporciona uma série de vantagens relacionadas à percepção do motorista e às condições de conforto e segurança.

Este trabalho contribui para o estabelecimento do comprimento desejável da espiral de transição, que muitas vezes causa dúvidas ao longo da elaboração do projeto geométrico. Levou-se em consideração a recomendação da AASHTO (2011), onde os valores são associados a um tempo de percurso de 2 segundos, que representa a trajetória natural de transição realizada pela maioria dos motoristas (DNIT, 2010a), pois o comprimento calculado pelo modelo de Perco (2005) resultou em comprimentos semelhantes ao da AASHTO (2011) e, além disso, este modelo limita o uso apenas para raios com valores entre 50 e 440 metros.

O estudo em questão possibilitou averiguar se este comprimento é suficiente para efetuar a transição da superelevação, garantindo conforto e segurança, bem como, permitiu verificar se este é menor que o comprimento crítico que causa risco de hidroplanagem.

A relação entre o comprimento da espiral de transição e a hidroplanagem não é abordada nos manuais brasileiros. O DER/SP (2006) cita que o efeito da hidroplanagem pode ser evitado ao proporcionar escoamento da água na superfície do pavimento através da macrotextura áspera, que mantém a resistência ao deslizamento em altas velocidades.

A hidroplanagem é um fenômeno onde o veículo que trafega sobre uma pista em condições de chuva perde o contato do pneu/pavimento, influenciado pelos seguintes fatores: comprimento das espirais de transição, declividade longitudinal, superelevação, estado de conservação dos pneus, tipo de ranhuras/sulcos dos pneus, textura/ rugosidade do pavimento, velocidade do veículo, coeficiente de atrito longitudinal/ transversal.

Para diminuir a incidência do fenômeno da hidroplanagem, os projetos de rodovias devem garantir escoamentos compatíveis para combater o problema e dar

segurança aos motoristas. Levando-se em consideração esses aspectos, algumas soluções de geometria que podem ser adotadas consistem em: utilizar menores comprimentos da clotóide, sendo suficientes para a transição da superelevação e/ou levar em consideração a quantidade de faixas de rolamentos a serem projetadas.

Algumas melhorias na sinalização também podem ser utilizadas como soluções nas zonas críticas, indicando com sinalização de indicação educativa, a necessidade de redução de velocidade em condições de chuvas fortes.

Além das propostas dos elementos de projeto geométrico e sinalização, existem soluções nos projetos de pavimentação, adotando-se pavimentos drenantes, aumentando a macrorrugosidade da camada de desgaste, executando ranhuras no pavimento ou aplicando drenos longitudinais.

O Tratamento Superficial Duplo (TSD) é a camada de revestimento do pavimento constituída por duas aplicações de ligante asfáltico, cobertas cada uma por camada de agregado mineral, submetidas à compressão (DNIT, 2010b). Oferece maior segurança aos usuários, pois proporciona uma aderência pneu/pavimento melhor e também evita o efeito "spray", quando a água é lançada no carro de trás por um veículo em movimento em pista molhada. Têm efeitos diretos na prevenção da aquaplanagem, dando maior capacidade de drenagem das águas superficiais.

A camada porosa de atrito (CPA) ou revestimento asfáltico drenante também diminui o risco de hidroplanagem e aumenta a aderência do pneu/pavimento devido à elevada permeabilidade causada pela grande porcentagem de vazios formados por fíler, agregados miúdos e ligantes asfálticos.

Durante o desenvolvimento do estudo de caso, deparou-se com algumas dificuldades, como falta de critério para escolha da chuva, valores estimados da linha de escoamento, com precisão insuficiente e dependência de outros parâmetros tipo textura do pavimento e do estado do pneu.

Apesar de não ter sido abordado no trabalho, o estado de conservação dos pneus também pode definir se irá ocorrer hidroplanagem. Um fenômeno mais comum em aeronaves é a hidroplanagem por desvulcanização, onde altas temperaturas na área de contato do pneu faz com que a borracha perca suas qualidades elásticas, tornando-se plástica. Este superaquecimento é causado pelo longo tempo de repetidas deformações locais.

Em virtude do que foi mencionado, conclui-se que o maior risco de hidroplanagem

ocorre em clotóides mais extensas, pois isto leva a uma transição da superelevação muito longa, elevando a extensão da zona crítica de inclinação transversal nula ou com inclinações muito baixas, ou seja, quando a diferença de inclinação entre o bordo externo e o eixo de rotação for quase nula por inversão do sentido da superelevação. Segundo cálculos, declividades longitudinais baixas apresentaram baixo risco de hidroplanagem, entretanto, este fator combinado com comprimento elevado de espiral de transição pode aumentar o risco. Um aspecto que agravou significativamente o risco é o aumento da quantidade de faixas de rolamento, o que aumenta o comprimento da linha de escoamento d'água. Portanto, uma pista dupla apresenta maiores probabilidades de ocorrer hidroplanagem do que em pistas simples, devido ao aumento do percurso da gota d'água, aumentando a espessura de lâmina d'água acima do topo da rugosidade e consequentemente, aumentando a chance do pneu perder o contato pneu/pavimento.

Velocidades elevadas também aumentam a possibilidade de ocorrência da hidroplanagem. A velocidade crítica, que é a velocidade imediatamente antes da hidroplanagem, foi equacionada em função da altura crítica da lâmina de água acima do topo da rugosidade do pavimento, sendo inversamente proporcionais.

Em relação aos tipos de revestimentos, dos quatro tipos distintos verificados no estudo de caso, constatou-se que o tratamento superficial betuminoso rugoso apresenta menor risco de apresentar hidroplanagem, ao contrário do concreto asfáltico liso.

Para trabalhos futuros, sugerem-se estudos quanto a alternativas de transição de superelevação fora da espiral de transição e também de estudos levando-se em consideração os acostamentos. Além disso, sugere-se uma análise mais detalhada dos resultados quanto a variações de inclinações longitudinais e transversais.

REFERÊNCIAS

AASHTO. **A Policy on Geometric Design of Highways and Streets (Green Book 2011)**. 6th ed. Washington, D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2011.

AUSTROADS. **Rural Road Design: Guide to the Geometric Design of Rural Roads**. 8th ed. Sydney: Association of Australian and New Zealand Road, 2003. 128p.

AZEVEDO, M. da C. M. **Indicadores de Segurança do Estado dos Pavimentos**. Fórum de Inovação e Normalização, Lisboa, 2010. Disponível em: <
http://www.inir.pt/sites/conferencias/documentos/Microsoft%20PowerPoint%20-%205%20Indicadores%20Estado_MCA.pdf>. Acesso em: 04 abr. 2012.

BONNISON, J. A. **Kinematic Approach to Horizontal Curve Transition Design**. Transportation Research Record, 2000. 8p.

BUCHARLES L. G. E.; FERNANDES JUNIOR J. L. **Influência da Superfície do Pavimento, da Drenagem, da Banda de Rodagem e da Velocidade no Fenômeno de Hidroplanagem**. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos – USP, 2009.

CHESTERTON, J.; NACEKIVELL N.; TUNNICLIFFE N. **The Use of the Gallaway Formula for Aquaplaning Evaluation in New Zealand**. New Zealand: NZIHT & Transit NZ 8th Annual Conference, 2006. 22p.

DER/SP. **Notas Técnicas de Projeto Geométrico**: NT-DE-F00-001. Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo, 2006.

DER/SP. **Projeto Padrão de Projeto Geométrico**: Distribuição da Transição da Superelevação. Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo,

2006. N. da obra: PP-DE-F07/022.

DNER. **Manual de Projeto Geométrico de Rodovias Rurais**. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Diretoria de Desenvolvimento Tecnológico, Divisão de Capacitação Tecnológica, 1999. 195p.

DNIT. **Manual de Drenagem de Rodovias**. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2006. 304p.

DNIT. **Manual de Projeto de Interseções**. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2005. 514p.

DNIT. **Manual de Projeto Geométrico de Travessias Urbanas**. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2010a. 392p.

DNIT. **Pavimento Asfáltico – Tratamento Superficial Duplo com Ligante Asfáltico Convencional** – Especificação de Serviço DNIT 147/2010-ES. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2010b. 9p. N.

EJZENBERG, S. **Os Veículos Pesados e a Segurança no Projeto das Curvas Horizontais de Rodovias e Vias de Trânsito Rápido**. Dissertação de mestrado. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - EPUSP, 2009.

FRANÇA, A. Q. S. **A Conforto e a Segurança como Critérios Condicionantes da Geometria do Traçado**. Tese de doutorado. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto, 1988. 367p.

KABBACH JUNIOR, F. I. **Notas de aula da disciplina de pós-graduação PTR 5725: Tópicos Avançados de Projeto Geométrico de Vias Rurais e Urbanas**. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - EPUSP, 2009.

KABBACH JUNIOR, F. I.; SUZUKI, C. Y.; TRENTIN, L. C. **Influência da intensidade pluviométrica nas condições de segurança em vias de múltiplas**

faixas de São Paulo. São Paulo: CONINFRA, 2010.

LAMM, R.; PSARIANOS, B.; MAILAENDER, T. **Highway Design and Traffic Safety Engineering Handbook.** New York: McGraw-Hill, 1999.

LEE, Shu Han. **Introdução ao Projeto Geométrico de Estradas.** Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, 2000.

MARTINEZ JUNIOR, F.; MAGNI, N. L. G. **Equações de Chuvas intensas do Estado de São Paulo.** São Paulo: Departamento de Águas e Energia Elétrica – DAEE e Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – EPUSP, 1999.

Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, Norme Funzionali e Geometriche per La Costruzione delle Strade. 1995.

PERCO, P. **Desirable Length of Spiral Curves for Two Lane Rural Roads.** Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 2005.

SAID, D.; Halim O. A. B.; Hassan, Y. **Desirable Spiral Length Based on Driver Steering Behaviour.** Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 2009.

SALPICO, F. **Estudo de Segurança Rodoviária, O Perigo Grave de Hidroplanagem nas Estradas Portuguesas – Formulação de Cálculo e Propostas para Resolução de Problemas.** OSEC – Observatório de Segurança de Estradas e Cidades, 2009, <http://www.cril-segura.com/HIDROPLANAGEM.pdf> (26/03/2011).

SORIANO, B. M. A.; Galdino, S. **Análise da Distribuição da Frequência Mensal de Precipitação para a Sub-região da Nhecolândia, Pantanal, Mato Grosso do Sul, Brasil.** Corumbá: Embrapa Pantanal, 2002. 22p.

VARDANEGA JUNIOR, L. I. **Hidroplanagem:** caracterização e análise da incidência em rodovias. Trabalho de diplomação – Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

ANEXO A

Quadrantes 1 e 2 do CASO 1

		Quadrante 1		Quadrante 2		final			
x	y	z1	z2	z1	z2	z1	z2	iw	Lw
13,761	7,200	1,523%	0,000%	1,000%	2,000%	1,523%	0,000%	1,523%	
13,661	7,200	1,523%	0,015%	1,000%	2,000%	1,523%	0,015%	1,523%	0,100
13,561	7,199	1,523%	0,029%	1,000%	2,000%	1,523%	0,029%	1,523%	0,100
13,461	7,197	1,523%	0,044%	1,000%	2,000%	1,523%	0,044%	1,523%	0,100
13,361	7,194	1,522%	0,058%	1,000%	2,000%	1,522%	0,058%	1,523%	0,100
13,261	7,190	1,522%	0,073%	1,000%	2,000%	1,522%	0,073%	1,524%	0,100
13,161	7,186	1,521%	0,087%	1,000%	2,000%	1,521%	0,087%	1,524%	0,100
13,061	7,180	1,520%	0,102%	1,000%	2,000%	1,520%	0,102%	1,524%	0,100
12,961	7,173	1,519%	0,116%	1,000%	2,000%	1,519%	0,116%	1,524%	0,100
12,861	7,166	1,518%	0,131%	1,000%	2,000%	1,518%	0,131%	1,524%	0,100
12,761	7,157	1,517%	0,145%	1,000%	2,000%	1,517%	0,145%	1,524%	0,100
12,661	7,147	1,516%	0,160%	1,000%	2,000%	1,516%	0,160%	1,524%	0,101
12,561	7,137	1,514%	0,174%	1,000%	2,000%	1,514%	0,174%	1,524%	0,101
12,461	7,125	1,512%	0,189%	1,000%	2,000%	1,512%	0,189%	1,524%	0,101
12,361	7,113	1,511%	0,203%	1,000%	2,000%	1,511%	0,203%	1,524%	0,101
12,261	7,099	1,509%	0,218%	1,000%	2,000%	1,509%	0,218%	1,524%	0,101
12,161	7,085	1,506%	0,233%	1,000%	2,000%	1,506%	0,233%	1,524%	0,101
12,061	7,069	1,504%	0,247%	1,000%	2,000%	1,504%	0,247%	1,524%	0,101
11,961	7,053	1,502%	0,262%	1,000%	2,000%	1,502%	0,262%	1,524%	0,102
11,861	7,036	1,499%	0,276%	1,000%	2,000%	1,499%	0,276%	1,525%	0,102
11,761	7,017	1,497%	0,291%	1,000%	2,000%	1,497%	0,291%	1,525%	0,102
11,661	6,998	1,494%	0,305%	1,000%	2,000%	1,494%	0,305%	1,525%	0,102
11,561	6,977	1,491%	0,320%	1,000%	2,000%	1,491%	0,320%	1,525%	0,102
11,461	6,956	1,488%	0,334%	1,000%	2,000%	1,488%	0,334%	1,525%	0,102
11,361	6,933	1,484%	0,349%	1,000%	2,000%	1,484%	0,349%	1,525%	0,103
11,261	6,910	1,481%	0,363%	1,000%	2,000%	1,481%	0,363%	1,525%	0,103
11,161	6,885	1,477%	0,378%	1,000%	2,000%	1,477%	0,378%	1,525%	0,103
11,061	6,860	1,474%	0,392%	1,000%	2,000%	1,474%	0,392%	1,525%	0,103
10,961	6,833	1,470%	0,407%	1,000%	2,000%	1,470%	0,407%	1,525%	0,104
10,861	6,806	1,466%	0,421%	1,000%	2,000%	1,466%	0,421%	1,525%	0,104
10,761	6,777	1,462%	0,436%	1,000%	2,000%	1,462%	0,436%	1,525%	0,104
10,661	6,747	1,457%	0,451%	1,000%	2,000%	1,457%	0,451%	1,525%	0,105
10,561	6,716	1,453%	0,465%	1,000%	2,000%	1,453%	0,465%	1,525%	0,105
10,461	6,684	1,448%	0,480%	1,000%	2,000%	1,448%	0,480%	1,526%	0,105
10,361	6,651	1,443%	0,494%	1,000%	2,000%	1,443%	0,494%	1,526%	0,106
10,261	6,617	1,438%	0,509%	1,000%	2,000%	1,438%	0,509%	1,526%	0,106
10,161	6,581	1,433%	0,523%	1,000%	2,000%	1,433%	0,523%	1,526%	0,106
10,061	6,545	1,428%	0,538%	1,000%	2,000%	1,428%	0,538%	1,526%	0,107
9,961	6,507	1,423%	0,552%	1,000%	2,000%	1,423%	0,552%	1,526%	0,107
9,861	6,468	1,417%	0,567%	1,000%	2,000%	1,417%	0,567%	1,526%	0,108
9,761	6,428	1,411%	0,581%	1,000%	2,000%	1,411%	0,581%	1,526%	0,108
9,661	6,387	1,405%	0,596%	1,000%	2,000%	1,405%	0,596%	1,526%	0,109

		Quadrante 1		Quadrante 2		final			
x	y	z1	z2	z1	z2	z1	z2	iw	Lw
9,561	6,345	1,399%	0,610%	1,000%	2,000%	1,399%	0,610%	1,526%	0,109
9,461	6,301	1,393%	0,625%	1,000%	2,000%	1,393%	0,625%	1,526%	0,110
9,361	6,256	1,386%	0,639%	1,000%	2,000%	1,386%	0,639%	1,526%	0,110
9,261	6,210	1,379%	0,654%	1,000%	2,000%	1,379%	0,654%	1,527%	0,111
9,161	6,163	1,372%	0,669%	1,000%	2,000%	1,372%	0,669%	1,527%	0,111
9,061	6,114	1,365%	0,683%	1,000%	2,000%	1,365%	0,683%	1,527%	0,112
8,961	6,064	1,358%	0,698%	1,000%	2,000%	1,358%	0,698%	1,527%	0,112
8,861	6,013	1,351%	0,712%	1,000%	2,000%	1,351%	0,712%	1,527%	0,113
8,761	5,960	1,343%	0,727%	1,000%	2,000%	1,343%	0,727%	1,527%	0,114
8,661	5,906	1,335%	0,741%	1,000%	2,000%	1,335%	0,741%	1,527%	0,114
8,561	5,850	1,327%	0,756%	1,000%	2,000%	1,327%	0,756%	1,527%	0,115
8,461	5,793	1,319%	0,770%	1,000%	2,000%	1,319%	0,770%	1,527%	0,116
8,361	5,735	1,310%	0,785%	1,000%	2,000%	1,310%	0,785%	1,527%	0,117
8,261	5,675	1,302%	0,799%	1,000%	2,000%	1,302%	0,799%	1,527%	0,117
8,161	5,614	1,293%	0,814%	1,000%	2,000%	1,293%	0,814%	1,528%	0,118
8,061	5,551	1,283%	0,828%	1,000%	2,000%	1,283%	0,828%	1,528%	0,119
7,961	5,486	1,274%	0,843%	1,000%	2,000%	1,274%	0,843%	1,528%	0,120
7,861	5,420	1,264%	0,857%	1,000%	2,000%	1,264%	0,857%	1,528%	0,121
7,761	5,352	1,255%	0,872%	1,000%	2,000%	1,255%	0,872%	1,528%	0,122
7,661	5,283	1,245%	0,887%	1,000%	2,000%	1,245%	0,887%	1,528%	0,123
7,561	5,211	1,234%	0,901%	1,000%	2,000%	1,234%	0,901%	1,528%	0,124
7,461	5,138	1,224%	0,916%	1,000%	2,000%	1,224%	0,916%	1,528%	0,125
7,361	5,064	1,213%	0,930%	1,000%	2,000%	1,213%	0,930%	1,528%	0,126
7,261	4,987	1,202%	0,945%	1,000%	2,000%	1,202%	0,945%	1,528%	0,127
7,161	4,908	1,190%	0,959%	1,000%	2,000%	1,190%	0,959%	1,529%	0,128
7,061	4,828	1,178%	0,974%	1,000%	2,000%	1,178%	0,974%	1,529%	0,130
6,961	4,745	1,166%	0,988%	1,000%	2,000%	1,166%	0,988%	1,529%	0,131
6,861	4,660	1,154%	1,003%	1,000%	2,000%	1,154%	1,003%	1,529%	0,132
6,761	4,573	1,141%	1,017%	1,000%	2,000%	1,141%	1,017%	1,529%	0,134
6,661	4,484	1,129%	1,032%	1,000%	2,000%	1,129%	1,032%	1,529%	0,136
6,561	4,393	1,115%	1,046%	1,000%	2,000%	1,115%	1,046%	1,529%	0,137
6,461	4,299	1,102%	1,061%	1,000%	2,000%	1,102%	1,061%	1,529%	0,139
6,361	4,203	1,088%	1,075%	1,000%	2,000%	1,088%	1,075%	1,530%	0,141
6,261	4,104	1,073%	1,090%	1,000%	2,000%	1,073%	1,090%	1,530%	0,143
6,161	4,002	1,058%	1,105%	1,000%	2,000%	1,058%	1,105%	1,530%	0,145
6,061	3,898	1,043%	1,119%	1,000%	2,000%	1,043%	1,119%	1,530%	0,147
5,961	3,791	1,028%	1,134%	1,000%	2,000%	1,028%	1,134%	1,530%	0,149
5,861	3,680	1,012%	1,148%	1,000%	2,000%	1,012%	1,148%	1,530%	0,151
5,761	3,567	0,995%	1,163%	1,000%	2,000%	0,000%	0,000%	0,000%	

ANEXO B

Quadrantes 3 e 4 do CASO 1

		Quadrante 3		Quadrante 4		final			
x	y	z1	z2	z1	z2	z1	z2	iw	Lw
13,761	7,200	1,523%	0,000%	1,523%	0,000%	1,523%	0,000%	1,523%	
13,861	7,200	1,523%	-0,015%	1,523%	-0,015%	1,523%	-0,015%	1,523%	0,100
13,961	7,199	1,523%	-0,029%	1,523%	-0,029%	1,523%	-0,029%	1,523%	0,100
14,061	7,197	1,523%	-0,044%	1,523%	-0,044%	1,523%	-0,044%	1,523%	0,100
14,161	7,194	1,522%	-0,058%	1,522%	-0,058%	1,522%	-0,058%	1,523%	0,100
14,261	7,190	1,522%	-0,073%	1,522%	-0,073%	1,522%	-0,073%	1,524%	0,100
14,361	7,186	1,521%	-0,087%	1,521%	-0,087%	1,521%	-0,087%	1,524%	0,100
14,461	7,180	1,520%	-0,102%	1,520%	-0,102%	1,520%	-0,102%	1,524%	0,100
14,561	7,173	1,519%	-0,116%	1,519%	-0,116%	1,519%	-0,116%	1,524%	0,100
14,661	7,166	1,518%	-0,131%	1,518%	-0,131%	1,518%	-0,131%	1,524%	0,100
14,761	7,157	1,517%	-0,145%	1,517%	-0,145%	1,517%	-0,145%	1,524%	0,100
14,861	7,147	1,516%	-0,160%	1,516%	-0,160%	1,516%	-0,160%	1,524%	0,101
14,961	7,137	1,514%	-0,174%	1,514%	-0,174%	1,514%	-0,174%	1,524%	0,101
15,061	7,125	1,512%	-0,189%	1,512%	-0,189%	1,512%	-0,189%	1,524%	0,101
15,161	7,113	1,511%	-0,203%	1,511%	-0,203%	1,511%	-0,203%	1,524%	0,101
15,261	7,099	1,509%	-0,218%	1,509%	-0,218%	1,509%	-0,218%	1,524%	0,101
15,361	7,085	1,506%	-0,233%	1,506%	-0,233%	1,506%	-0,233%	1,524%	0,101
15,461	7,069	1,504%	-0,247%	1,504%	-0,247%	1,504%	-0,247%	1,524%	0,101
15,561	7,053	1,502%	-0,262%	1,502%	-0,262%	1,502%	-0,262%	1,524%	0,102
15,661	7,036	1,499%	-0,276%	1,499%	-0,276%	1,499%	-0,276%	1,525%	0,102
15,761	7,017	1,497%	-0,291%	1,497%	-0,291%	1,497%	-0,291%	1,525%	0,102
15,861	6,998	1,494%	-0,305%	1,494%	-0,305%	1,494%	-0,305%	1,525%	0,102
15,961	6,977	1,491%	-0,320%	1,491%	-0,320%	1,491%	-0,320%	1,525%	0,102
16,061	6,956	1,488%	-0,334%	1,488%	-0,334%	1,488%	-0,334%	1,525%	0,102
16,161	6,933	1,484%	-0,349%	1,484%	-0,349%	1,484%	-0,349%	1,525%	0,103
16,261	6,910	1,481%	-0,363%	1,481%	-0,363%	1,481%	-0,363%	1,525%	0,103
16,361	6,885	1,477%	-0,378%	1,477%	-0,378%	1,477%	-0,378%	1,525%	0,103
16,461	6,860	1,474%	-0,392%	1,474%	-0,392%	1,474%	-0,392%	1,525%	0,103
16,561	6,833	1,470%	-0,407%	1,470%	-0,407%	1,470%	-0,407%	1,525%	0,104
16,661	6,806	1,466%	-0,421%	1,466%	-0,421%	1,466%	-0,421%	1,525%	0,104
16,761	6,777	1,462%	-0,436%	1,462%	-0,436%	1,462%	-0,436%	1,525%	0,104
16,861	6,747	1,457%	-0,451%	1,457%	-0,451%	1,457%	-0,451%	1,525%	0,105
16,961	6,716	1,453%	-0,465%	1,453%	-0,465%	1,453%	-0,465%	1,525%	0,105
17,061	6,684	1,448%	-0,480%	1,448%	-0,480%	1,448%	-0,480%	1,526%	0,105
17,161	6,651	1,443%	-0,494%	1,443%	-0,494%	1,443%	-0,494%	1,526%	0,106
17,261	6,617	1,438%	-0,509%	1,438%	-0,509%	1,438%	-0,509%	1,526%	0,106
17,361	6,581	1,433%	-0,523%	1,433%	-0,523%	1,433%	-0,523%	1,526%	0,106
17,461	6,545	1,428%	-0,538%	1,428%	-0,538%	1,428%	-0,538%	1,526%	0,107
17,561	6,507	1,423%	-0,552%	1,423%	-0,552%	1,423%	-0,552%	1,526%	0,107
17,661	6,468	1,417%	-0,567%	1,417%	-0,567%	1,417%	-0,567%	1,526%	0,108
17,761	6,428	1,411%	-0,581%	1,411%	-0,581%	1,411%	-0,581%	1,526%	0,108
17,861	6,387	1,405%	-0,596%	1,405%	-0,596%	1,405%	-0,596%	1,526%	0,109

		Quadrante 3		Quadrante 4		final			
x	y	z1	z2	z1	z2	z1	z2	iw	Lw
17,961	6,345	1,399%	-0,610%	1,399%	-0,610%	1,399%	-0,610%	1,526%	0,109
18,061	6,301	1,393%	-0,625%	1,393%	-0,625%	1,393%	-0,625%	1,526%	0,110
18,161	6,256	1,386%	-0,639%	1,386%	-0,639%	1,386%	-0,639%	1,526%	0,110
18,261	6,210	1,379%	-0,654%	1,379%	-0,654%	1,379%	-0,654%	1,527%	0,111
18,361	6,163	1,372%	-0,669%	1,372%	-0,669%	1,372%	-0,669%	1,527%	0,111
18,461	6,114	1,365%	-0,683%	1,365%	-0,683%	1,365%	-0,683%	1,527%	0,112
18,561	6,064	1,358%	-0,698%	1,358%	-0,698%	1,358%	-0,698%	1,527%	0,112
18,661	6,013	1,351%	-0,712%	1,351%	-0,712%	1,351%	-0,712%	1,527%	0,113
18,761	5,960	1,343%	-0,727%	1,343%	-0,727%	1,343%	-0,727%	1,527%	0,114
18,861	5,906	1,335%	-0,741%	1,335%	-0,741%	1,335%	-0,741%	1,527%	0,114
18,961	5,850	1,327%	-0,756%	1,327%	-0,756%	1,327%	-0,756%	1,527%	0,115
19,061	5,793	1,319%	-0,770%	1,319%	-0,770%	1,319%	-0,770%	1,527%	0,116
19,161	5,735	1,310%	-0,785%	1,310%	-0,785%	1,310%	-0,785%	1,527%	0,117
19,261	5,675	1,302%	-0,799%	1,302%	-0,799%	1,302%	-0,799%	1,527%	0,117
19,361	5,614	1,293%	-0,814%	1,293%	-0,814%	1,293%	-0,814%	1,528%	0,118
19,461	5,551	1,283%	-0,828%	1,283%	-0,828%	1,283%	-0,828%	1,528%	0,119
19,561	5,486	1,274%	-0,843%	1,274%	-0,843%	1,274%	-0,843%	1,528%	0,120
19,661	5,420	1,264%	-0,857%	1,264%	-0,857%	1,264%	-0,857%	1,528%	0,121
19,761	5,352	1,255%	-0,872%	1,255%	-0,872%	1,255%	-0,872%	1,528%	0,122
19,861	5,283	1,245%	-0,887%	1,245%	-0,887%	1,245%	-0,887%	1,528%	0,123
19,961	5,211	1,234%	-0,901%	1,234%	-0,901%	1,234%	-0,901%	1,528%	0,124
20,061	5,138	1,224%	-0,916%	1,224%	-0,916%	1,224%	-0,916%	1,528%	0,125
20,161	5,064	1,213%	-0,930%	1,213%	-0,930%	1,213%	-0,930%	1,528%	0,126
20,261	4,987	1,202%	-0,945%	1,202%	-0,945%	1,202%	-0,945%	1,528%	0,127
20,361	4,908	1,190%	-0,959%	1,190%	-0,959%	1,190%	-0,959%	1,529%	0,128
20,461	4,828	1,178%	-0,974%	1,178%	-0,974%	1,178%	-0,974%	1,529%	0,130
20,561	4,745	1,166%	-0,988%	1,166%	-0,988%	1,166%	-0,988%	1,529%	0,131
20,661	4,660	1,154%	-1,003%	1,154%	-1,003%	1,154%	-1,003%	1,529%	0,132
20,761	4,573	1,141%	-1,017%	1,141%	-1,017%	1,141%	-1,017%	1,529%	0,134
20,861	4,484	1,129%	-1,032%	1,129%	-1,032%	1,129%	-1,032%	1,529%	0,136
20,961	4,393	1,115%	-1,046%	1,115%	-1,046%	1,115%	-1,046%	1,529%	0,137
21,061	4,299	1,102%	-1,061%	1,102%	-1,061%	1,102%	-1,061%	1,529%	0,139
21,161	4,203	1,088%	-1,075%	1,088%	-1,075%	1,088%	-1,075%	1,530%	0,141
21,261	4,104	1,073%	-1,090%	1,073%	-1,090%	1,073%	-1,090%	1,530%	0,143
21,361	4,002	1,058%	-1,105%	1,058%	-1,105%	1,058%	-1,105%	1,530%	0,145
21,461	3,898	1,043%	-1,119%	1,043%	-1,119%	1,043%	-1,119%	1,530%	0,147
21,561	3,791	1,028%	-1,134%	1,028%	-1,134%	1,028%	-1,134%	1,530%	0,149
21,661	3,680	1,012%	-1,148%	1,012%	-1,148%	1,012%	-1,148%	1,530%	0,151
21,761	3,567	0,995%	-1,163%	0,995%	-1,163%	0,995%	-1,163%	1,530%	0,154
21,861	3,450	0,978%	-1,177%	0,978%	-1,177%	0,978%	-1,177%	1,531%	0,156
21,961	3,330	0,961%	-1,192%	0,961%	-1,192%	0,961%	-1,192%	1,531%	0,159
22,061	3,206	0,943%	-1,206%	0,943%	-1,206%	0,943%	-1,206%	1,531%	0,162

		Quadrante 3		Quadrante 4		final			
x	y	z1	z2	z1	z2	z1	z2	iw	Lw
22,161	3,078	0,924%	-1,221%	0,924%	-1,221%	0,924%	-1,221%	1,531%	0,166
22,261	2,945	0,905%	-1,235%	0,905%	-1,235%	0,905%	-1,235%	1,531%	0,169
22,361	2,809	0,885%	-1,250%	0,885%	-1,250%	0,885%	-1,250%	1,531%	0,173
22,461	2,668	0,865%	-1,264%	0,865%	-1,264%	0,865%	-1,264%	1,532%	0,177
22,561	2,521	0,843%	-1,279%	0,843%	-1,279%	0,843%	-1,279%	1,532%	0,182
22,661	2,370	0,821%	-1,293%	0,821%	-1,293%	0,821%	-1,293%	1,532%	0,187
22,761	2,212	0,798%	-1,308%	0,798%	-1,308%	0,798%	-1,308%	1,532%	0,192
22,861	2,048	0,775%	-1,323%	0,775%	-1,323%	0,775%	-1,323%	1,533%	0,198
22,961	1,878	0,750%	-1,337%	0,750%	-1,337%	0,750%	-1,337%	1,533%	0,204
23,061	1,699	0,724%	-1,352%	0,724%	-1,352%	0,724%	-1,352%	1,533%	0,212
23,161	1,513	0,697%	-1,366%	0,697%	-1,366%	0,697%	-1,366%	1,533%	0,220
23,261	1,316	0,668%	-1,381%	0,668%	-1,381%	0,668%	-1,381%	1,534%	0,230
23,361	1,110	0,638%	-1,395%	0,638%	-1,395%	0,638%	-1,395%	1,534%	0,240
23,461	0,891	0,606%	-1,410%	0,606%	-1,410%	0,606%	-1,410%	1,535%	0,253
23,561	0,659	0,573%	-1,424%	0,573%	-1,424%	0,573%	-1,424%	1,535%	0,268
23,661	0,410	0,536%	-1,439%	0,536%	-1,439%	0,536%	-1,439%	1,536%	0,286
23,761	0,142	0,497%	-1,453%	0,497%	-1,453%	0,497%	-1,453%	1,536%	0,309
23,861	-0,151	0,455%	-1,468%	0,455%	-1,468%	0,000%	0,000%	0,000%	