



**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA**

**Área Departamental de Engenharia Civil**



## **Estudo da divergência entre duas vias que curvam em sentidos contrários**

**HUGO ANDRÉ MEIRA DA CRUZ LAVAREDAS**  
Licenciado em Engenharia Civil

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre em Engenharia  
Civil na Área de Especialização de Vias de Comunicação e Transportes

Orientador:

Armando António Pereira Teles Fortes, Licenciado em Eng.<sup>a</sup> Civil

Júri:

Presidente: João Alfredo Ferreira dos Santos, Doutorado em Eng.<sup>a</sup> Civil

Vogais: Luísa Maria Ferreira Cardoso Teles Fortes, Licenciada em Eng.<sup>a</sup> Civil

Armando António Pereira Teles Fortes, Licenciado em Eng.<sup>a</sup> Civil

**Dezembro de 2013**



## RESUMO

O presente trabalho tem por base os estudos desenvolvidos pela Eng<sup>a</sup> Luísa Teles Fortes, tendo por objetivo estudar o comportamento de duas vias que curvam em sentidos contrários, garantindo a largura das bermas e do dispositivo frontal de segurança (guarda - pode ter raio igual a 2m ou raio igual a 1m, para ângulos entre fileiras de guardas de segurança  $<15^\circ$  e  $>15^\circ$ , respetivamente). Pretende-se igualmente garantir a devida compatibilização altimétrica e planimétrica da zona de divergência entre o ramo de ligação e a autoestrada.

Tendo em consideração que a norma de nós de ligação não indica qual a metodologia de cálculo de uma zona de divergência, considerou-se pertinente o estudo aprofundado desta temática.

Assim, o presente trabalho reveste-se de um duplo sentido: numa primeira fase pretende-se efetuar uma análise das normas portuguesas e americana (AASHTO, 2001); numa segunda etapa demonstrar-se-á a metodologia de cálculo da divergência a aplicar em dois casos de estudo – divergência localizada numa curva à esquerda da via principal com raio igual a 5000 metros e com raio igual a 700 metros.

O desenvolvimento dos referidos estudos de caso, permitiu concluir, em primeiro plano, que a compatibilização altimétrica e planimétrica para um raio igual a 5000 metros é realizada de forma mais simples, uma vez que um alinhamento curvo com raio deste valor se assemelha ao comportamento de um alinhamento reto, não implicando grandes condicionantes no referido dimensionamento.

Por outro lado, no segundo caso, a curva circular à esquerda relativa à secção corrente da autoestrada necessita de contemplar uma sobreelevação de valor igual a 7%. Esta condicionante obrigará a variar 14% de sobreelevação de uma plataforma para a outra. Para garantir o correto dimensionamento desta segunda hipótese foi necessário efetuar duas quebras na inclinação transversal da cunha,

de modo a respeitar as diferenças algébricas recomendadas na Norma de Nós de Ligação (JAE, 1993).

**PALAVRAS-CHAVE:** Nó de Ligação, ramo de saída, loop, divergência, cunha, nariz, sobreelevação e sobrelargura.

## ABSTRACT

This thesis is based on studies conducted by Eng.<sup>a</sup> Luísa Teles Fortes, aiming to study the behavior of two roads that curve in opposite directions, ensuring that the width of the nose and front safety device (guards), which can have a radius equal to 2m or equal to 1m radius, for angles between rows of security guards less than 15° degrees and more than 15° degrees, respectively. It is also intended to ensure proper compatibility of altimetric and planimetric area of divergence between the branch connection and the freeway.

Considering that the Portuguese Interchanges Manual's does not indicate which method of calculating a divergence zone,

Thus, this work has a double propose: initially intended to carry out an analysis of the Portuguese and American Manual's (AASHTO, 2001), by which, in a second stage will demonstrate the methodology for calculating the divergence to be applied in two case studies - divergence located on a left curve with a radius equals to 5000 and 700 meters.

The development of these case studies concluded in the foreground, the planimetric and altimetric compatibility to a radius = 5000 is realized in a simpler way, since a radius of the curved alignment value resembles the behavior of an alignment straight, not implying that major constraints in design stages.

On the other hand, in the second case, the circular left curve of the highway needs to cover superelevation value equal to 7%. This condition will require a 14% range of superelevation tax of a platform to other. To ensure the correct design of this second hypothesis was necessary to make two breaks in the cross slope of the wedge, so as to respect the algebraic differences recommended in Portuguese Interchange Manual's (JAE, 1993).

KEY WORDS: Interchange, exit ramp, loop, divergence, neutral area, nose, superelevation and widening.



## AGRADECIMENTOS

Muito embora o Trabalho Final de Mestrado se assuma, pela sua finalidade académica, como um trabalho individual, existem contributos que não podem deixar de ser realçados. Por essa razão, quero expressar os mais sinceros agradecimentos a todas as pessoas que, de alguma forma, contribuíram para a sua realização, em especial:

- Ao digníssimo professor orientador desta dissertação, Engenheiro Armando Teles Fortes, pelo rigor científico das suas orientações que possibilitaram o enriquecimento desta dissertação, pela confiança depositada e pela disponibilidade, apoio e incentivo.

- À Engenheira Luísa Maria da Conceição Ferreira Cardoso Teles Fortes, por ter facultado o seu estudo sobre “*Zonas de Divergência associadas aos Ramos de Saída dos Nós de Ligação*”, o qual serviu de base para este trabalho final de mestrado.

- À minha esposa por acreditar em mim nos maiores momentos de dúvida e por me acompanhar durante todo este processo, encorajando-me sempre a fazer mais e melhor. Sem ti não seria possível superar este desafio.

- Aos amigos, com destaque para Tiago Pinto, Octávio Mota e Hugo Rocha, por todo o incentivo, dedicação e apoio incondicional, e sobretudo, pelos longos debates que tanto enriqueceram o conteúdo desta dissertação.

- À minha família.

A todos, muito obrigado.



## ÍNDICE DO TEXTO

1. Introdução .....	1
1.1. Enquadramento do tema .....	1
1.2. Objetivos .....	2
1.3. Metodologia.....	2
1.4. Estrutura .....	4
2. Análise de Normas .....	5
2.1. Velocidade.....	6
2.2. Distância de Visibilidade de Decisão .....	8
2.3. Vias de desaceleração.....	10
2.4. Clotóides .....	15
2.5. Sobrelargura .....	16
2.6. Sobreelevação.....	17
2.7. Divergência .....	21
3. Metodologia de Cálculo de Divergências .....	25
3.1. Condicionantes que influenciam o cálculo de divergências .....	25
3.2. Compatibilização planimétrica e altimétrica do traçado.....	30
4. Casos de Estudo .....	37
4.1. Curva à esquerda de $R = 5\ 000$ metros .....	41
4.2. Curva à esquerda de $R = 700$ metros .....	50
4.3. Determinação da guia associada à berma esquerda do ramo de ligação .....	57
4.4. Discussão de Resultados.....	60
5. Considerações Finais .....	63
Referências Bibliográficas.....	65
Anexos.....	67
Anexo A – Correta apresentação de peças desenhadas .....	67
Anexo B – Esquema de cálculo para a determinação das coordenadas do ramo.....	75
Anexo C - Método de cálculo da curva circular .....	83
Anexo D – Cálculo da rasante do ramo de ligação.....	87
Anexo E – Parâmetros da diretriz da autoestrada ( $R=5000$ metros).....	91
Anexo F – Parâmetros da rasante da autoestrada, na zona do ramo de saída .....	93
Anexo G – Parâmetros de traçado do restabelecimento .....	95
Anexo H – Parâmetros e fórmulas das curvas de transição do ramo de ligação, associado a $R=5000$ metros.....	97
Anexo I – Parâmetros planimétricos do <i>loop</i> , associado a um raio de 5000 metros.....	99
Anexo J – Cálculo auxiliar para análise das diferenças algébricas na zona de divergência .....	101
Anexo K – Cálculo auxiliar para análise das diferenças algébricas na zona de convergência .....	103
Anexo L – Parâmetros da diretriz da autoestrada ( $R=700$ metros).....	105

Anexo M – Parâmetros e fórmulas das curvas de transição do ramo de ligação, associado a R=700 metros .....	107
Anexo N – Parâmetros planimétricos do <i>loop</i> , associado a um raio de 700 metros .....	109
Anexo O – Cálculo auxiliar para análise das diferenças algébrica na zona de divergência (R=700m) .....	111
Anexo P – Cálculo auxiliar para análise das diferenças algébrica na zona de convergência (R=700m) .....	113
Anexo Q – Perfil Transversal tipo da autoestrada, restabelecimento e nó de ligação (2 peças desenhadas) .....	115
Anexo R – Planta geral do Nó de Ligação (1 peça desenhada) .....	117
Anexo S – Planta e Perfil para raio de 5000 (2 peças desenhadas) .....	119
Anexo T – Planta e Perfil para raio de 700 (2 peças desenhadas) .....	121
Anexo U – Planta de pormenor para raio de 5000 (1 peça desenhada) .....	123
Anexo V – Planta de pormenor para raio de 700 (1 peça desenhada) .....	125

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Nó de ligação sem via coletora-distribuidora no loop de saída .....	10
Figura 2.2 – Vias de desaceleração do tipo paralelo.....	12
Figura 2.3 – Vias de desaceleração do tipo paralelo, numa curva à esquerda .....	14
Figura 2.4 – Extrato da figura n.º13 – “Disfarce da sobrelevação”, da Norma de Nós de Ligação .....	21
Figura 3.1 – Troço de clotóide com afastamento $Y = 0,50m$ .....	26
Figura 3.2 – Zona de variação para a largura tipo do ramo .....	27
Figura 3.3 – Troço de clotóide com afastamento $Y$ .....	28
Figura 3.4 – Sobrelargura no Ramo de Saída .....	28
Figura 3.5 – Zona de variação da sobrelevação .....	29
Figura 3.6 – Exemplo de divergência mal dimensionada .....	30
Figura 3.7 – Exemplo da passagem dos pontos de cálculo da secção corrente para o limite da faixa de rodagem (25 em 25 metros) .....	31
Figura 3.8 – Informação de 8,333 em 8,333 metros .....	32
Figura 3.9 – Processo iterativo para concluir compatibilização da planimetria .....	33
Figura 3.10 – Definição da largura do ramo associada a cada perfil .....	34
Figura 3.11 – Definição da sobrelevação associada a cada perfil do ramo .....	35
Figura 3.12 – Pontos notáveis para a correta definição de uma divergência .....	36
Figura 4.1 – Planta Geral do Nó original.....	38
Figura 4.2 – Planta Geral do Nó (solução associada a um raio de 5000m) .....	38
Figura 4.3 – Planta Geral do Nó (solução associada a um raio de 700m) .....	39
Figura 4.4 – Cálculo da guia esquerda do ramo de ligação .....	57
Figura 4.5 – Expressão relativa à sobrelargura instantânea .....	59
Figura A.1 – Exemplo de informação incompleta no início de um Ramo de Saída .....	68
Figura A.2 – Exemplo de informação completa no início de um Ramo de Saída .....	69
Figura A.3 – Perfil transversal da autoestrada alargado na zona do ramo .....	71
Figura A.4 – Informação completa relativa a uma divergência entre uma estrada nacional e um ramo de ligação.....	73
Figura B.5 – Esquema de cálculo da curva circular com transições em clotóides iguais .....	75
Figura C.6 – Esquema do método de cálculo Curva Circular.....	83
Figura C.7 – Esquema do método de cálculo Clotóides .....	84
Figura D.8 – Esquema de cálculo da concordância vertical .....	87
Figura D.9 – Esquema de cálculo da tangente.....	87



## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Velocidade base e Velocidade de tráfego .....	6
Quadro 2.2 – Velocidade base dos ramos de ligação .....	7
Quadro 2.3 – Distância de visibilidade de decisão nas saídas dos IP's e IC's.....	9
Quadro 2.4 – Comprimentos mínimos das vias de desaceleração, do tipo de paralelo, associadas a $ilong \leq 2\%$ .....	13
Quadro 2.5 – Fatores corretivos das vias de desaceleração segundo a $ilong$ .....	13
Quadro 2.6 – Extensão mínima das curvas de transição dos ramos de ligação .....	16
Quadro 2.7 - Sobrelargura das Curvas dos Ramos de Ligação.....	17
Quadro 2.8 – Sobreelevação em curva na faixa de rodagem da autoestrada .....	18
Quadro 2.9 – Sobreelevação dos Ramos de Ligação .....	19
Quadro 2.10 – Transição da Sobreelevação (SE) nas Curvas dos Ramos de Ligação.....	20
Quadro 2.11 – Diferença Máxima entre a Inclinação Transversal da Estrada Principal e de um Ramo de Ligação.....	22
Quadro 4.1 – Elementos planimétricos e altimétricos arbitrados como ponto de partida de cálculo.....	39
Quadro 4.2 – Coordenadas planimétricas e rumo da curva circular da autoestrada na zona do ramo de saída .....	42
Quadro 4.3 – Coordenadas planimétricas e rumo do ponto inicial de cálculo do ramo de saída.....	42
Quadro 4.4 – Coordenadas planimétricas e rumo do ponto final de cálculo do ramo de saída e da diretriz do restabelecimento .....	43
Quadro 4.5 – Parâmetros da clotóide de entrada – autoestrada .....	44
Quadro 4.6 – Parâmetros da clotóide de saída – restabelecimento .....	44
Quadro 4.7 – Valores da sobreelevação na clotóide de entrada do ramo .....	46
Quadro 4.8 – Valores da sobreelevação na clotóide de saída do ramo .....	47
Quadro 4.9 – Variação da sobrelargura na clotóide de entrada .....	49
Quadro 4.10 – Variação da sobrelargura na clotóide de saída.....	49
Quadro 4.11 – Coordenadas planimétricas e rumo da curva circular da autoestrada na zona do ramo de saída (RAE=700m) .....	51
Quadro 4.12 – Coordenadas planimétricas e rumo do ponto inicial de cálculo do ramo de saída (RAE=700m) .....	51
Quadro 4.13 – Coordenadas planimétricas e rumo do ponto final de cálculo do ramo de saída e da diretriz do restabelecimento (RAE=700m).....	52
Quadro 4.14 – Parâmetros da clotóide de entrada – AE (RAE=700m) .....	52
Quadro 4.15 – Parâmetros da clotóide de saída – Rest. (RAE=700m) .....	53
Quadro 4.16 – Valores da SE na clotóide de entrada do ramo (RAE=700m) .....	53
Quadro 4.17 – Valores da SE na clotóide de saída do ramo (RAE=700m) .....	54
Quadro 4.18 – Variação da sobrelargura na clotóide de entrada (RAE=700m) .....	55
Quadro 4.19 – Variação da sobrelargura na clotóide de saída (RAE=700m) .....	55
Quadro 4.20 – Variações planimétricas instantâneas ao longo da clotóide .....	58



## LISTA DE SIGLAS

ISEL:	Instituto Superior de Engenharia de Lisboa
JAE:	Junta Autónoma de Estradas (extinta)
INIR:	Instituto Nacional de Infraestruturas Rodoviárias, IP
EP:	Estradas de Portugal. S.A.
AASHTO:	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
LNEC:	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
DEC:	Departamento de Engenharia Civil
PAT:	Projeto Avançado de Traçado – disciplina integrante do ramo de Vias de comunicação e Transportes do mestrado em Engenharia Civil do ISEL
EA:	Estradas e Arruamentos - disciplina integrante do ramo de Vias de Comunicação e Transportes do mestrado em Engenharia Civil do ISEL
VC:	Vias de Comunicação - disciplina integrante da licenciatura em Engenharia Civil do ISEL

## LISTA DE ABREVIATURAS

%:	Percentagem.
$\Delta$ :	Delta (variação).
$\equiv$ :	Coincidente.
$\Delta_i$ :	Obliquidade, inclinação longitudinal do bordo exterior da faixa de rodagem em relação ao eixo (%).
$\Delta_r$ :	Ripagem de uma curva absoluta.
:	Módulo ou valor absoluto.
<:	Menor.
=:	Igual.
>:	Maior.
$\alpha$ :	Ângulo de desvio (alfa).
A:	Parâmetro da clotóide.
AE:	Autoestrada.
B:	Bissectriz da curva.
c:	Centro da curva circular.

Cos:	Coseno de um ângulo.
cv:	Curva vertical.
D:	Desenvolvimento da curva vertical.
d:	Distância entre dois pontos.
DD:	Distância de visibilidade de decisão.
Gr	Grados (200 gr) = $180^\circ = \pi$
I	Inclinação longitudinal de um trainel.
$i_{ins}$	Inclinação longitudinal instantânea.
$i_{trans}$	Inclinação transversal.
J:	Taxa de variação da aceleração centrífuga.
Km/h:	Quilômetros por hora.
Km:	Ponto quilômetro.
L:	Extensão dos elementos planimétricos.
l:	Largura.
$m/s^2$ :	Metro por segundo ao quadrado.
$m/s^3$ :	Metro por segundo ao cubo.
M:	Distância ao meridiano de origem (central).
m:	Metros.
°	Graus
P:	Distância à perpendicular de origem.
PTT:	Perfil Transversal Tipo.
R:	Raio da curva circular.
r:	Rumo; $\alpha$ ; $\Delta y$ ; X; Y
RA:	Raio mínimo absoluto.
rad	Radianos.
rest.:	Restabelecimento.
RN:	Raio mínimo normal.
Rs:	Raio mínimo sem sobreelevação.
$R_v$ :	Raio da concordância vertical.
SE:	Sobreelevação de uma curva.
sen ou sin:	Seno de um ângulo.
SL:	Sobrelargura de uma curva.
T:	Tangente (distância entre o ponto de tangência e o vértice da curva).
$T_1$ :	Ponto de tangência 1.
TE:	Terminais duplos especiais (guarda de segurança).
$T_f$ :	Ponto de tangência final.
Tg ou Tan:	Tangente de um ângulo.
$T_i$ :	Ponto de tangência inicial.

v:	Vértice das curvas planimétricas e altimétricas.
VB:	Velocidade de base.
VT:	Velocidade de Tráfego.
X:	Abcissa cartesiana da clotóide.
Y:	Ordenada cartesiana da clotóide.
Z:	Cota.
$\pi$ :	Valor de pi.
v:	Velocidade.
$\varphi$ :	Desvio angular da curva de transição relativamente ao alinhamento reto inicial ou final (rad).



## Glossário de termos técnicos

Alinhamento curvo:	Curva circular.
Alinhamento reto:	Elemento planimétrico em que o raio é igual a infinito ( $R=\infty$ ).
Amortecedor de choque:	Dispositivo de retenção de veículos descontrolados que possibilita a dissipação de energia de forma mais segura.
Autoestrada interurbana:	Via pública destinada ao tráfego de médio e longo curso, com separação física de faixas de rodagem, sem cruzamentos de nível nem acessos a propriedades marginais, com acessos condicionados e sinalizada como tal.
Autoestrada:	Via rápida com todos os acessos condicionados, sem intersecções e destinada exclusivamente a veículos motorizados.
Berma:	Superfície da plataforma da estrada que ladeia a faixa de rodagem, a qual não se destina ao trânsito de veículos.
Bisel:	Elemento geométrico de transição entre a secção corrente e as vias auxiliares de variação de velocidade. Varia a sua largura de forma linear.
Clotóide:	Curva de transição entre elementos planimétricos de arcos e curvaturas distintos.
Concordância vertical:	Curva vertical.
Convergência:	Zona de contacto entre o ramo de entrada e a via principal.
Cota:	Altura de um ponto em relação ao nível médio do mar.
Cunha (Área Neutra):	Área delimitada por duas faixas de rodagem que convergem ou divergem e pelo nariz, destinada à recuperação de veículos pelo que deve estar desimpedida.
Diferença algébrica:	Valor obtido entre a diferença de inclinações transversais da cunha e plataformas que a delimitam.
Directriz:	Eixo do cálculo planimétrico.
Distância de visibilidade de decisão:	Mínima distância de visibilidade de que necessita o condutor de um veículo para tomar decisões atempadas.
Divergência:	Zona de separação entre a secção corrente do autoestrada e o ramo de saída.
Faixa de rodagem:	Zona da plataforma, entre as respetivas bermas, destinada à circulação de veículos.
Início da cunha (nariz pintado):	Vértice de intersecção da guia direita do autoestrada e da guia esquerda do ramo. Nesta secção transversal o ramo tem 4,0m.

Nariz aparente (nariz fictício):	Ponto de intersecção das guias relativas ao limite das plataformas da secção corrente e do ramo de ligação.
Nariz físico:	Ponto de separação das plataformas da secção corrente e do ramo de ligação.
Nariz:	Semirreta perpendicular à bissetriz do ângulo formado por duas faixas de rodagem que convergem ou divergem.
Nó de Ligação:	Ligação desnivelada entre a autoestrada e a rede viária envolvente.
Plataforma:	Zona constituída pelas faixas de rodagem, pelo separador e pelas bermas.
Ponto de tangência:	Ponto inicial/final de um elemento geométrico.
Ramo de saída:	Estrada de um nó de ligação que possibilita a saída da autoestrada.
Ramo indireto ( <i>loop</i> ):	Ramo de saída associada a velocidades base reduzidas.
Rasante:	Eixo de cálculo altimétrico.
Rumo:	Ângulo medido em grados entre o Norte e o respectivo ponto quilométrico.
Secção Corrente (também designada por Plena Via):	Toda a extensão da autoestrada ao longo da qual é adotado o perfil transversal tipo definido.
Secção transversal:	Corte transversal da plataforma ao respectivo quilómetro.
Separador:	Zona ou dispositivo (e não simples marca) destinada a separar tráfegos no mesmo sentido ou em sentidos opostos.
Sobreelevação:	Inclinação transversal associada a curvas circulares. Depende do raio e da velocidade.
Sobrelargura:	Incremento de largura para raios de curvas circulares cujo valor é reduzido.
Trainel:	Elemento altimétrico de inclinação longitudinal constante.
Velocidade base:	Velocidade estabelecida na elaboração de um projeto, que condiciona as características geométricas da estrada.
Via de aceleração:	Via destinada a permitir que os veículos que entram numa estrada adquiram a velocidade conveniente para se incorporarem na corrente de tráfego principal.
Via de circulação:	Zona longitudinal da faixa de rodagem destinada à circulação de uma única fila de veículos.
Via de desaceleração:	Via destina a permitir que os veículos que saiem de uma estrada abrandem a velocidade já fora da corrente de tráfego principal.

## **1. Introdução**

### **1.1. Enquadramento do tema**

Uma das zonas do traçado da secção corrente das infraestruturas rodoviárias que exige maior cuidado em termos de dimensionamento corresponde às divergências entre o itinerário principal e os ramos de saída que integram os Nós de Ligação.

A configuração destas zonas de divergência deve permitir a eventual recuperação da estabilidade de viaturas que se tenham descontrolado durante a aproximação à saída, em particular garantindo a compatibilização das cotas da via principal e do ramo de saída, de modo a que a cunha se apresente adequadamente desempenada e com uma inclinação transversal compatível com a das vias que a enquadram.

Neste sentido, o presente trabalho enquadra-se no âmbito do dimensionamento de divergências dos ramos de ligação e da segurança rodoviária dos utilizadores, tendo como ponto de partida o estudo desenvolvido e facultado pela Engenheira Luísa Teles Fortes, intitulado “Zonas de Divergência associadas aos Ramos de Saída dos Nós de Ligação”. Quando o ramo de saída está a curvar em sentido contrário ao da via principal, a extensão da divergência diminui e paralelamente aumentam as dificuldades de compatibilização provocadas pelas sobrelevações e pelas eventuais sobrelarguras associadas.

Deste modo, é essencial verificar se existem eventuais lacunas normativas sobre esta matéria e estabelecer uma sequência de passos na análise da situação e o estabelecimento de metodologias de cálculo.

## **1.2. Objetivos**

O presente trabalho tem por objetivo geral determinar o procedimento de cálculo para obtenção de divergências associadas a ramos indiretos localizados numa curva circular à esquerda da secção corrente da autoestrada.

Este objetivo geral subdivide-se em objetivos específicos, abordados de forma sequencial, que versam sobre as seguintes áreas: (i) recolha de documentação, pretendendo-se coligir a documentação existente em Portugal e noutros países de referência sobre esta matéria; (ii) análise comparativa de documentação, propondo-se comparar a documentação, de modo a detetar eventuais lacunas normativas; (iii) metodologia de cálculo, estabelecendo uma sequência de procedimentos que garantam o dimensionamento adequado de divergências entre duas vias que curvam em sentidos contrários; (iv) e por fim, o presente estudo culmina com o objetivo de propor medidas normativas.

## **1.3. Metodologia**

Para concretizar os objetivos propostos foi adotada uma metodologia de realização organizada em cinco fases: (1) pesquisa de dados bibliográficos; (2) consulta e comparação da documentação recolhida, identificando eventuais lacunas normativas; (3) determinação da metodologia de cálculo a adotar no dimensionamento de uma divergência devidamente compatibilizada altimétrica e planimetricamente; (4) apresentação de novas medidas normativas resultantes das conclusões do estudo efetuado; (5) redação da dissertação e apresentação de dois casos práticos elucidativos.

No que se refere à primeira e segunda fases, foram consultadas diversas normas, entre as quais as normas Inglesa e Australiana - excluídas de uma análise mais profunda por nestes países se conduzir no sentido contrário e como tal a divergência em vez de se encontrar do lado direito da plena via é materializada do lado esquerdo da faixa de rodagem; Espanhola e Francesa – onde também não é apresentada de forma sucinta e clara a metodologia

apropriada para a correta implantação de uma divergência em vias que curvam em sentidos contrários; e por fim, as normas Portuguesas e a Americana – esta última considerou-se a mais adequada em termos de dimensionamento de todo o nó de ligação, sendo por isso, a escolhida como referência na análise das normas portuguesas de traçado, intersecções e nós de ligação no âmbito do presente estudo.

Posteriormente, é explanada a metodologia de cálculo a adotar no correto dimensionamento de uma divergência entre duas vias que curvam em sentidos contrários. A compatibilização planimétrica é efetuada através de um processo iterativo, onde o parâmetro fixo de referência é a distância entre a diretriz da plena via e a guia associada à berma direita da faixa de rodagem onde se materializará o ramo de saída. Deste modo, é possível determinar a sobrelargura associada ao ramo de saída e conseqüentemente a largura da cunha. Concluída a compatibilização planimétrica, é possível realizar o cálculo altimétrico do ramo de ligação e, conseqüentemente, definir altimetricamente toda a divergência associada às duas plataformas. Nesta fase, a variação da sobreelevação entre o valor associado à curva circular da plena via e o valor relativo à curva circular do ramo de ligação condiciona toda a compatibilização altimétrica, uma vez que deverão ser respeitados os valores máximos relativos às diferenças algébricas recomendados na Norma de Nós de Ligação.

Com o objetivo de aprofundar este tema estudaram-se dois casos, ambos associados a curvas à esquerda na autoestrada. No primeiro caso, considerou-se uma curva circular da plena via cujo valor do raio é igual a 5 000 metros, valor esse que dispensa sobreelevação por ter um comportamento semelhante ao de um alinhamento reto. Assim toda a faixa de rodagem terá uma inclinação transversal igual a 2,50%, com pendente para o exterior da plataforma, o que facilita a compatibilização altimétrica com o ramo de saída. No segundo caso, o valor do raio da curva circular da autoestrada é igual a 700 metros, pois corresponde ao raio mínimo absoluto para uma velocidade base de 120 km/h e que está associado ao valor máximo de sobreelevação, nomeadamente igual a

7,00% (pendente para o separador central), dificultando a compatibilização altimétrica.

Com base nos casos de estudo acima mencionados, apresentou-se algumas propostas de medidas normativas e/ou complemento das recomendações já apresentadas nas Normas Portuguesas relativas à temática abordada na presente dissertação.

As fases aqui apresentadas foram realizadas num período de seis meses, entre Abril e Setembro de 2013.

#### **1.4. Estrutura**

A dissertação de mestrado aqui apresentada encontra-se estruturada em cinco capítulos essenciais, finalizando com as referências bibliográficas e anexos.

Deste modo, o presente trabalho inicia-se com a introdução, contemplando o enquadramento do tema, objetivos, metodologia de trabalho e estrutura do mesmo. Segue-se no segundo capítulo a análise das normas existentes, contemplando como temas de interesse a velocidade, a distância de visibilidade de decisão, vias de desaceleração, clotóides, sobrelargura e divergência. O terceiro capítulo é dedicado à metodologia de cálculo de divergências, seguindo-se, no quarto capítulo uma menção à correcta apresentação de peças desenhadas.

No capítulo 4 são apresentados dois estudos de caso abordando uma divergência localizada numa curva à esquerda da plena via com raio igual a 5 000 metros e raio igual a 700 metros e, é realizada a discussão dos resultados encontrados.

Por fim, no capítulo 5 serão apresentadas as considerações finais do trabalho realizado, abordando-se as principais conclusões, propostas normativas, limitações ao estudo e perspetivas para investigações futuras.

## 2. Análise de Normas

As normas portuguesas são manuais que englobam diversas recomendações sobre os diversos parâmetros necessários para o correto dimensionamento de um projeto rodoviário. Apesar de não constituírem um decreto-lei, na generalidade dos casos os projetistas adotam as suas recomendações.

Porém, em alguns casos específicos, estes documentos normativos são omissos ou contraditórios com outras normas portuguesas e/ou estrangeiras, o que possibilita várias interpretações por parte dos diversos intervenientes na construção de uma infraestrutura.

Importa salientar, que foram consultadas diversas normas estrangeiras, entre as quais as normas Inglesa e Australiana - excluídas de uma análise mais profunda por nestes países se conduzir no sentido contrário e como tal a divergência em vez de se encontrar do lado direito da plena via é materializada do lado esquerdo da faixa de rodagem; Espanhola e Francesa – onde também não é apresentada de forma sucinta e clara a metodologia apropriada para a correta implantação de uma divergência em vias que curvam em sentidos contrários; e, ainda, a Americana – esta última considerou-se a mais adequada em termos de dimensionamento de todo o nó de ligação, sendo por isso, a escolhida como referência na análise das normas portuguesas de traçado, intersecções e nós de ligação no âmbito do presente estudo.

Assim, é de extrema importância rever alguns fundamentos teóricos que influenciam o correto dimensionamento de uma divergência entre curvas circulares de sentido oposto, tais como: velocidade; distâncias de visibilidade (condiciona os valores das concordâncias convexas na aproximação ao ramo de saída); vias de desaceleração; sobrelargura; sobrelevação; divergência e clotóides (condiciona a compatibilização planimétrica entre ambas as plataformas, uma vez que o valor do seu raio e do rumo variam instantaneamente).

## 2.1. Velocidade

Num projeto rodoviário consideram-se duas velocidades: a base e a de tráfego. Ambas condicionam algumas das características geométricas da estrada, nomeadamente o raio mínimo em planta, a inclinação máxima do trainel e o perfil transversal tipo, no caso da velocidade base, sendo que a velocidade de tráfego condiciona as distâncias de visibilidade e o raio mínimo das concordâncias verticais.

A velocidade de tráfego é aquela que corresponde ao percentil 85 da curva de distribuição cumulativa de velocidades numa secção de estrada, sendo normalmente considerada como uma velocidade crítica, pois velocidades superiores a esta não garantem a comodidade e segurança dos utilizadores.

No Quadro 2.1 é possível identificar qual a velocidade de tráfego correspondente a uma dada velocidade base.

**Quadro 2.1 – Velocidade base e Velocidade de tráfego**

<b>Velocidade Base (VB)</b>	<b>Velocidade de Tráfego (VT)</b>
40	50
50	60
60	80
70	90
80	100
90	110
100	120
110	125
120	130

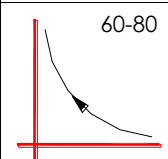
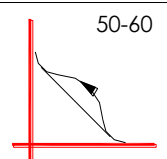
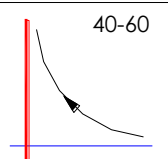
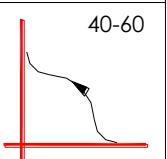
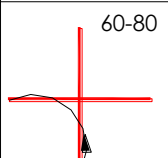
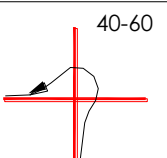
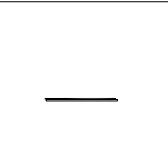
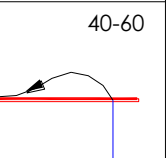
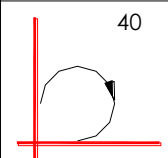

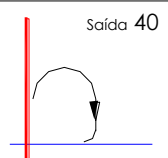
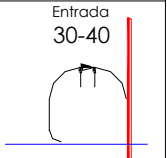
Fonte: Documento base – Revisão da Norma de Traçado (Inir, 2011)

Relativamente aos ramos de ligação de um nó rodoviário, a velocidade base pode variar entre 40 e 80 km/h.

Contudo, para as ligações interiores, a velocidade base deverá ser a que consta no Quadro 2.2, uma vez que velocidades superiores originariam custos elevados em consequência do desenvolvimento do ramo de ligação ser maior.

É ainda importante referir, que na aproximação à divergência, as distâncias de visibilidade relativas às concordâncias convexas deverão estar de acordo com a velocidade de tráfego da estrada principal e não a relativa ao raio da curva circular do ramo.

**Quadro 2.2 – Velocidade base dos ramos de ligação**

RAMOS DE LIGAÇÃO	Ligações entre Auto-Estradas		Ligações entre outras estradas*	
	TRAÇADO			
	Normal	Adaptado	Normal	Adaptado
DIRECTO	 60-80	 50-60	 40-60	 40-60
SEMIDIRECTO	 60-80	 40-60	 40-60	 40-60
INDIRECTO	 40	 Saída 40 Entrada 30	 Saída 40	 Entrada 30-40
(DIRECTO)	60-80 Vias C-D		40-80	

\* - Podendo uma delas ser auto-estrada

Fonte: Norma de Nós de Ligação (JAE, 1993)

## 2.2. Distância de Visibilidade de Decisão

A visibilidade dos condutores numa infraestrutura rodoviária complexa como uma autoestrada é de fundamental importância para a segurança e eficiência da condução.

Assim, os projetistas deverão ter especial atenção a este parâmetro, de modo a assegurar os valores mínimos recomendados nas normas para que os utilizadores tenham a possibilidade de controlar a velocidade do seu veículo evitando desta forma colisões com potenciais obstáculos.

A aproximação a um nó de ligação exige ao utilizador uma atenção redobrada pois depara-se com muita sinalização de informação que nem sempre se encontra clara ou com os níveis de retroreflexão mínimos estipulados em documentação própria. Este facto torna mais tardia a compreensão por parte do utente, razão pela qual é crucial a garantia da distância de visibilidade de decisão, a qual é função da velocidade de tráfego (2.6).

(2.1.)

$$DD = 3,3 \times VT$$

DD – Distância de visibilidade de decisão (m);

VT – Velocidade de tráfego (km/h).

A distância de visibilidade de decisão deve ser verificada em todas as saídas dos Itinerários Principais e Complementares, tendo em consideração os valores apresentados no Quadro 2.3<sup>1</sup>:

---

<sup>1</sup> Na Norma de Nós de Ligação as distâncias de visibilidade vêm em função da velocidade base (JAE, 1993), situação que a Revisão da Norma de Traçado – documento base do INIR – já retificou (Inir, 2011).

**Quadro 2.3 – Distância de visibilidade de decisão nas saídas dos IP's e IC's**

<b>Velocidade de Tráfego (km/h)</b>	<b>Distância de Visibilidade de Decisão (m)</b>
100	330
110	370
120	400

Fonte: Norma de Traçado (Inir, 2011)

Os ramos de saída, sempre que possível, deverão situar-se em alinhamentos retos, com objetivo de assegurar uma boa distância de visibilidade, e ótimas condições operacionais ao tráfego.

No caso de ramos indiretos (“loop”), usuais nos nós de ligação em trevo, geralmente necessitam de uma via coletora-distribuidora, pois o entrecruzamento de veículos que entram e saem da autoestrada deverá ser materializado numa via secundária onde a diferença de velocidades de circulação dos veículos é menor.

Neste âmbito, a Norma de Nós de Ligação indica que “a distância entre a estrutura e o “nariz” da saída deverá portanto ser igual à extensão do bisel da via de desaceleração mais, pelo menos, 50,0 metros” (JAE, 1993).

No entanto, devido à ocupação de solos ou por razões económicas encontram-se diversos exemplos em Portugal de nós de ligação em trevo (completo ou incompleto) que não contemplam vias coletoras-distribuidoras.

Na Figura 2.1 ilustra-se um nó de ligação do tipo trevo incompleto.



**Figura 2.1 – Nó de ligação sem via coletora-distribuidora no loop de saída**

Fonte: Google Earth

Deste modo, o dimensionamento da divergência, associada ao ramo indireto, assume particular importância pelo que deverá ser rigoroso e, assim, garantir as condições necessárias à recuperação de veículos.

A Figura 2.1 ilustra um *loop* de saída nas condições mais desfavoráveis para o cálculo de uma divergência, uma vez que a diretriz da secção corrente da autoestrada, nessa secção, apresenta uma curva circular à esquerda. O facto de ambas as plataformas (autoestrada e ramo de saída) curvarem em sentidos opostos origina um afastamento mais célere e conseqüentemente mais obstáculos no cálculo de compatibilização, tais como diferenças algébricas acentuadas devido às sobrelevações das vias de circulação.

### **2.3. Vias de desaceleração**

As normas portuguesas não são claras no que respeita à definição do dimensionamento de vias de desaceleração, uma vez que podem encontrar-se

diversas referências contraditórias e omissão de informação crucial. Neste âmbito, considera-se que as normas deveriam ser reformuladas, no sentido de estabelecer diretrizes que norteiem os projetistas.

As vias de desaceleração contemplam dois tipos de dimensionamento: o tipo direto e o tipo paralelo. O tipo direto fornece uma saída direta, enquanto o tipo paralelo tem uma via adicional para redução de velocidade.

De acordo com a Norma de Nós de Ligação, todas as saídas devem ser efetuadas por meio de vias de desaceleração, obtendo uma maior segurança e comodidade na circulação, com exceção das autoestradas as quais deverão contemplar saídas do tipo direto (JAE, 1993). Porém, a Norma americana ASSHTO (2001) contradiz as nossas normas ao afirmar que as vias de desaceleração do tipo paralelo são mais eficientes, uma vez que o decréscimo de velocidade é materializado numa via auxiliar sem consequências para o tráfego da plena via. Por outro lado, as normas americanas determinam a extensão da referida via em função da velocidade da plena via e da velocidade associada à curva do ramo de ligação, razão pela qual adotaremos a sua metodologia<sup>2</sup>.

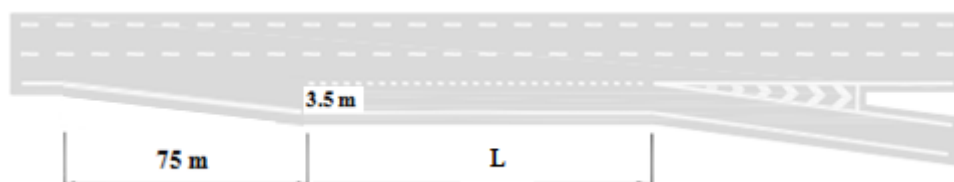
Tendo em consideração as recomendações da bibliografia consultada, nomeadamente a ASSHTO, considera-se que deveria ser reconsiderada a não utilização de vias de desaceleração de tipo direto, de modo a garantir uma maior segurança para os utilizadores.

Uma saída da plena via do tipo paralelo inicia-se com um bisel, seguido de uma via adicional paralela à faixa de rodagem da estrada principal. Este tipo de saída fornece uma área de saída convidativa, porque a vista breve do bisel e a largura adicional da via auxiliar são muito aparentes. Na Figura 2.2 ilustra-se, de forma

---

<sup>2</sup> Apenas a largura da via de desaceleração será diferente do recomendado nas normas americanas, uma vez que é prática comum adotar-se uma largura de 3,50 metros (de acordo com a Norma de Interseções) ou 3,75 metros, em detrimento dos 3,60 metros indicados na ASSHTO (2001).

meramente esquemática, uma saída do tipo paralelo. Em que o bisel terá uma extensão de 75 metros para uma  $V_b = 120$  km/h e, em que a via de desaceleração, terá no seu início, uma largura de 3,50 ou 3,75 metros, de acordo com a largura das vias de circulação da faixa de rodagem da plena via.



**Figura 2.2 – Vias de desaceleração do tipo paralelo**

Fonte: ASSHTO (2001)

O comprimento de uma via de desaceleração do tipo paralelo é normalmente medido a partir do ponto associado ao final do bisel, onde a via adicional atinge uma largura de 3,5 m ou 3,75 m, até ao ponto onde a via de circulação do ramo de ligação adquire a largura de 4,0 metros, correspondente ao ponto inicial do cálculo.

Os comprimentos mínimos das vias de desaceleração encontram-se no Quadro 2.4, e os ajustes para as classes são dadas no Quadro 2.5. As vias de desaceleração do tipo paralelo são mais funcionais e devem apresentar, segundo a norma americana,  $L \geq 240$  m (AASHTO, 2001).

Importa, referir, que a extensão da via de desaceleração depende da inclinação longitudinal da via principal e, sobretudo, das velocidades de circulação na autoestrada e respetivo ramo de saída. Para inclinações longitudinais inferiores a 2,0% o Quadro 2.4 apresenta os valores recomendados para a extensão da referida via auxiliar de redução de velocidade, onde na primeira coluna se apresenta as diversas velocidades base da plena via e na segunda linha as respetivas velocidades base do ramo de saída.

**Quadro 2.4 – Comprimentos mínimos das vias de desaceleração, do tipo de paralelo, associadas a  $i_{long} \leq 2\%$**

Extensão da via de desaceleração, L (m) para a velocidade base na curva do ramo de saída, V' (km/h)									
Velocidade base da AE, V (km/h)	Velocidade tráfego da AE, Va (km/h)	Condição de paragem	20	30	40	50	60	70	80
			Velocidade de tráfego na curva do ramo de saída, V'a (km/h)						
		0	20	28	35	42	51	63	70
50	47	75	70	60	45	-	-	-	-
60	55	95	90	80	65	55	-	-	-
70	63	110	105	95	85	70	55	-	-
80	70	130	125	115	100	90	80	55	-
90	77	145	140	135	120	110	100	75	60
100	85	170	165	155	145	135	120	100	85
110	91	180	180	170	160	150	140	120	105
120	98	200	195	185	175	170	155	140	120

V	=	Velocidade base da AE (km/h)	
Va	=	Velocidade tráfego da AE (km/h)	
V'	=	Velocidade base na curva do ramo de saída (km/h)	
V'a	=	Velocidade de tráfego na curva do ramo de saída (km/h)	

Fonte: ASSHTO (2001)

No que se refere, ao Quadro 2.5 os fatores corretivos variam consoante a inclinação longitudinal da autoestrada. Caso a rasante da plena via apresente inclinação instantânea ascendente superior a 3,0%, a extensão da via de desaceleração deverá ser reduzida. Por outro lado, caso a inclinação longitudinal instantânea esteja associada a uma descida, o comprimento da via auxiliar deverá ser aumento em pelo menos 20,0%.

**Quadro 2.5 – Fatores corretivos das vias de desaceleração segundo a  $i_{long}$**

Velocidade base da AE (km/h)	Vias de desaceleração	
	Razão entre a extensão da via de desaceleração em perfil longitudinal e em planta	
Todas as velocidades	3% a 4% de inclinação longitudinal 0,9	-3% a -4% de inclinação longitudinal 1,2
Todas as velocidades	5% a 6% de inclinação longitudinal 0,8	-5% a -6% de inclinação longitudinal 1,35

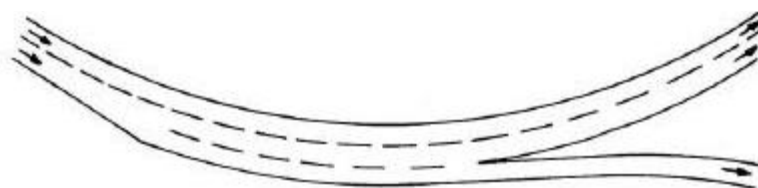
Fonte: ASSHTO

Relativamente ao bisel de uma via de desaceleração do tipo paralelo a ASSHTO (2001) afirma que o mesmo deve ter uma inclinação de cerca de 15:1 a 25:1 (longitudinal: transversal). Neste âmbito, refere-se que um bisel longo indica o caminho a ser seguido e reduz a área da via de desaceleração não utilizada atraindo deste modo o condutor para a via de desaceleração. Assim, um pequeno bisel proporciona ao utilizador uma melhor aproximação à via de desaceleração.

O projeto das vias de desaceleração, do tipo paralelo, localizadas em curvas de uma infraestrutura com  $VB \geq 100$  km/h, é aproximadamente igual aos projetos das vias auxiliares situadas num alinhamento reto e as referidas vias geralmente apresentam a mesma curvatura que a estrada principal.

Porém, as saídas localizadas em curvas à esquerda podem ser particularmente problemáticas, devido ao facto do tráfego da via de circulação exterior tender a seguir para o ramo de ligação. Nestes casos deve dimensionar-se corretamente a divergência, a fim de facilitar a conveniente variação da sobrelevação.

Deste modo, a ASSHTO (2001) indica que as saídas situadas em curvas à esquerda devem ser evitadas, se possível. Apresenta-se na Figura 2.3 uma via de desaceleração do tipo paralelo, localizada numa curva à esquerda.



**Figura 2.3 – Vias de desaceleração do tipo paralelo, numa curva à esquerda**

Fonte: ASSHTO (2001)

Importa, ainda, referir que os ramos de saída deverão apresentar um perfil longitudinal idêntico ao da via de circulação exterior da plena via, numa extensão de pelo menos 60,0 metros, de forma a materializarem um traçado ideal.

## 2.4. Clotóides

De acordo com a revisão da norma de traçado, as curvas de transição são dispensadas quando as curvas circulares não necessitam de sobrelevação.

Tendo em consideração que um ramo de saída habitualmente contempla raios de menor dimensão associados a sobrelevação será necessário dimensionar as curvas de transição, as quais são caracterizadas pela seguinte expressão:

(2.2.)

$$A^2 = RL$$

A – parâmetro da clotóide (m)

R – raio da curva circular (m)

L – extensão da clotóide (m)

O parâmetro da clotóide (A) a adotar deverá ser tal, que a curva de transição satisfaça quatro condições: a) a comodidade e a segurança ( $J = 0,5 \text{ m/s}^3$ ); b) o desenvolvimento da sobrelevação e sobrelargura; c) a percepção ótica e; d) estética do traçado.

No caso dos nós de ligação “as condições a que devem satisfazer as curvas de transição são idênticas às relativas a pleno traçado” (JAE, 1993). No entanto, para  $R \leq 120,0$  metros as condições são mais restritivas, uma vez que os utilizadores da infraestrutura aceitam valores superiores para a aceleração centrípeta e a sobrelevação, pois maioritariamente os ramos de ligação contemplam apenas uma via de sentido único.

No Quadro 2.6 indicam-se as extensões mínimas das curvas de transição e o respetivo parâmetro aproximado das clotóides, assim como os valores de aderência transversal ( $f_t = \frac{v^2}{127 \times R}$ , [m/s<sup>2</sup>]) e de taxa de variação da aceleração centrífuga ( $J = \frac{v_b^3}{A^2} \times \frac{1}{3,6^3}$ , [m/s<sup>3</sup>]).

**Quadro 2.6 – Extensão mínima das curvas de transição dos ramos de ligação**

Velocidade Base (km/h)	Raio Mínimo (m)	Extensão Mínima da Transição (m)	Pâmetro da Clotóide (m)	$f_t$ ( $m/s^2$ )	J ( $m/s^3$ )
25	15	15	15,0	0,328	1,488
30	25	21	22,5	0,283	1,143
35	35	24	28,0	0,276	1,172
40	45	28	36,0	0,280	1,058
45	60	32	45,0	0,266	0,965
50	75	36	52,0	0,263	0,991
55	90	40	60,0	0,265	0,991
60	120	45	75,0	0,236	0,823

Fonte: adaptado de Norma de Nós de Ligação (JAE, 1993)

Da análise efetuada ao quadro anterior constata-se que o valor máximo admissível para a aceleração centrífuga a materializar nos ramos de ligação, é de 0,33.g, sendo consideravelmente superior aos 0,22.g do pleno traçado. Já a taxa de variação da aceleração centrífuga deverá ser inferior a  $1,5 m/s^3$ , valor este também bastante superior aos  $0,5 m/s^3$  considerados para a plena via.

## 2.5. Sobrelargura

A sobrelargura é o aumento da largura da via em função do raio da curva e do comprimento e distância entre eixos do veículo. Como é natural a trajetória realizada por um veículo ligeiro difere muito da materializada por um veículo pesado articulado ou com reboque, pelo que é o veículo com a trajetória mais desfavorável que determina ou não a introdução de uma largura adicional na respetiva curva circular.

A transição da largura da via é efetuada ao longo da extensão da curva de transição, vulgo clotóide, sendo que a sobrelargura é normalmente introduzida no intradorso da curva circular.

Segundo a Norma de Nós de Ligação, “todas as curvas dos ramos de ligação, exceto nos casos de reconstrução, devem ser dimensionadas em função do veículo-articulado”, ou seja, se o raio da curva circular for inferior a 90,0 metros e o ângulo entre os alinhamentos inferior a 130 graus devem-se adotar as sobrelarguras indicadas no Quadro 2.7. Porém, se o ângulo entre alinhamentos for superior a 130 graus, não se considera sobrelargura (JAE, 1993). O ângulo entre alinhamentos diz respeito ao ângulo formado entre as diretrizes da plena via e do restabelecimento, ou seja, é a diferença entre os rumos instantâneos verificados no ponto inicial e final do cálculo do ramo de ligação.

**Quadro 2.7 - Sobrelargura das Curvas dos Ramos de Ligação**

<b>Raio (m)</b>	<b>Sobrelargura (m)</b>	<b>Largura Total da via (m)</b>
35	2,00	6,00
45	1,25	5,25
55	1,00	5,00
65	0,60	4,60
75	0,30	4,30
90	0,00	4,00

Fonte: Norma de Nós de Ligação (JAE, 1993)

## **2.6. Sobreelevação**

A sobreelevação adotada nas curvas circulares contribui para a segurança e comodidade da circulação, uma vez que possibilita que parte a força da

gravidade compense a força centrífuga, melhora a percepção e a orientação ótica nas curvas.

No Quadro 2.8 apresentam-se os valores da sobreelevação a adotar na faixa de rodagem da autoestrada, em função do raio da curva circular.

**Quadro 2.8 – Sobreelevação em curva na faixa de rodagem da autoestrada**

Estradas de faixa única, com dois sentidos		Estradas com dupla faixa de rodagem	
<i>Raio (m)</i>	<i>Sobreelevação (%)</i>	<i>Raio (m)</i>	<i>Sobreelevação (%)</i>
<525	7,0	<1100	7,0
525	6,5	1100	6,5
600	6,0	1300	6,0
700	5,5	1500	5,5
850	5,0	1750	5,0
1000	4,5	2000	4,5
1200	4,0	2250	4,0
1400	3,5	2600	3,5
1600	3,0	3000	3,0
1900 ≤ R < 2500	2,5	3500 ≤ R < 5000	2,5
≥ 2500	–	≥ 5000	–

Fonte: Norma de Traçado (Inir, 2011)

Segundo a Norma de Traçado “*todas as vias de circulação adicionais, bem como as bermas pavimentadas, devem ter a mesma sobreelevação que as vias principais. Esta regra é válida também para as vias de desaceleração*” (Inir, 2011).

Relativamente à sobreelevação associada às curvas circulares de um ramo de ligação, a Norma de Nós de Ligação (JAE, 1993) indica que aplicam-se os mesmos princípios gerais que condicionam a sobreelevação a adotar nas curvas de uma estrada, tendo como valor máximo admissível 12% em curvas de raio diminuto, e de sentido único, sempre que não haja perigo de gelo ou neve. Neste último caso, o valor máximo deverá ser 6% ou 8%.

No Quadro 2.9 indicam-se os intervalos da sobreelevação em função do raio da curva circular e da velocidade no ramo de ligação. Porém, a Norma de Nós de Ligação salvaguarda que as sobreelevações escolhidas deverão estar compreendidas no terço superior do respetivo intervalo.

**Quadro 2.9 – Sobreelevação dos Ramos de Ligação**

Raio (m)	Velocidade Base (km/h)						
	30	35	40	45	50	55	60
25 – 30	2 – 12	–	–	–	–	–	–
35 – 40	2 – 10	3 – 12	–	–	–	–	–
45 – 50	2 – 8	3 – 10	4 – 12	–	–	–	–
60	2 – 6	3 – 8	4 – 9	6 – 12	–	–	–
75	2 – 5	3 – 6	3 – 7	5 – 9	7 – 12	–	–
90	2 – 4	3 – 5	3 – 6	4 – 7	5 – 9	8 – 12	–
120	2 – 3	2 – 4	3 – 5	3 – 6	4 – 7	6 – 9	8 – 12
150	2 – 3	2 – 3	3 – 4	3 – 5	4 – 6	6 – 8	7 – 10
175	2 – 3	2 – 3	2 – 4	3 – 4	3 – 5	5 – 7	6 – 8
250	2 – 3	2 – 3	2 – 3	3 – 4	3 – 4	5 – 6	5 – 7
300	2 – 3	2 – 3	2 – 3	2 – 3	3 – 4	4 – 5	4 – 6

Fonte: Norma de Nós de Ligação (JAE, 1993)

No que se refere à transição da sobreelevação a materializar no ramo de ligação, a Norma de Nós de Ligação indica que apesar dos princípios a considerar serem os mesmos praticados na plena via, os ramos podem assumir

uma taxa de variação da sobrelevação mais elevada. O Quadro 2.10 indica os valores normais da variação de sobrelevação recomendados para os ramos de ligação (JAE, 1993).

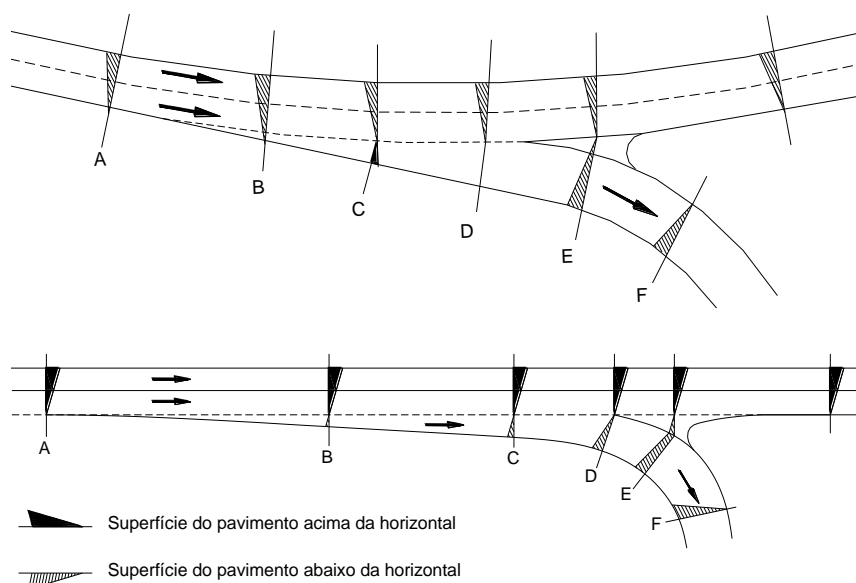
**Quadro 2.10 – Transição da Sobrelevação (SE) nas Curvas dos Ramos de Ligação**

<b>Velocidade no Ramo (km/h)</b>	<b>25 a 30</b>	<b>40</b>	<b>50</b>	<b>&gt; 60</b>
Variação máxima da SE (%) em cada 20,0 metros de extensão	5,3	4,7	4	3,3

Fonte: Norma de Nós de Ligação (JAE, 1993)

Na Figura 2.4 é possível analisar como deve ser efetuado o disfarce da sobrelevação quando o ramo de saída se localiza numa curva circular à esquerda e numa situação associada a um ramo com via de desaceleração.

Nos casos em que o traçado da plena via é um alinhamento reto ou uma curva circular de raio igual ou superior a 5000 metros (sem necessidade de adotar sobrelevação) e contempla via de desaceleração, não se verifica necessidade de apresentar quebras de inclinação transversal na guia esquerda do ramo, que delimita a “cunha”.



**Figura 2.4 – Extrato da figura n.º13 – “Disfarce da sobrelevação”, da Norma de Nós de Ligação**

Fonte: Norma de Nós de Ligação (JAE, 1993)

Ainda neste âmbito, a ASSHTO (2001) menciona que para as situações de divergência associadas a curvas circulares de sentidos opostos a sobrelevação poderá ser garantida tanto por uma única quebra ou por uma dupla descontinuidade na inclinação transversal sobre o pavimento da cunha na zona que antecede o nariz.

## 2.7. Divergência

Segundo a Norma de Nós de Ligação (JAE, 1993), a sobrelevação adotada no ramo de ligação deverá garantir que a diferença algébrica das inclinações transversais da estrada principal e do ramo contíguo seja da ordem dos 4 a 5%.

No Quadro 2.11 apresentam-se os valores recomendáveis.

**Quadro 2.11 – Diferença Máxima entre a Inclinação Transversal da Estrada Principal e de um Ramo de Ligação**

<b>Velocidade no Ramo (km/h)</b>	<b>Diferença Algébrica Máxima (%)</b>
25 a 30	5 a 8
40 a 50	5 a 6
> 60	4 a 5

Fonte: Norma de Nós de Ligação (JAE, 1993)

A zona imediatamente antes de uma divergência ou que precede uma convergência de duas vias designa-se por cunha, sendo o nariz o vértice definido pelos limites das vias.

A Norma de Nós de Ligação (JAE, 1993) refere que a cunha corresponde à zona triangular que antecede ou sucede ao nariz, cuja extensão varia entre 20,0 e 30,0 metros.

A cunha deve ser pavimentada para permitir manobrar o veículo na área de recuperação, mas deverão ser materializadas no pavimento marcas rodoviárias, de modo a delimitar corretamente a divergência e encaminhar os utilizadores para o ramo de ligação. Por outro lado, o “nariz” físico, no caso de uma divergência, situa-se além da intersecção teórica dos extremos das vias divergentes e terá uma largura compreendida entre 6,0 e 9,0 metros.

Não obstante, a Norma de Nós de Ligação (JAE, 1993) indica que devido ao maior número de acidentes ocorridos nas saídas, torna-se necessário que a cunha e a zona posterior ao nariz fiquem livres de qualquer obstáculo que possa ser perigoso, assim como evitar-se diferenças algébricas acentuadas (desníveis bruscos entre pavimentos).

Segundo Teles Fortes (2009) *“não existem efectivamente critérios normativos de cálculo ou de representação das zonas de divergência associadas aos Ramos de Saída dos Nós de Ligação, pelo que a análise dos projectos, neste caso particular, terá que ser baseada em critérios de boa prática, tendo como objectivo principal garantir uma superfície desempenada, com inclinação transversal na cunha simultaneamente compatível com a sobreelevação da Auto-estrada e do Ramo de Saída, devendo a informação apresentada ser suficiente para a materialização da solução, sem possibilidade de interpretação alternativa de execução”*.

Assim, uma divergência bem dimensionada na eventualidade de contemplar obstáculos perigosos em caso de despiste e/ou colisão permitiria a correta materialização do projeto de equipamentos de segurança, ou seja permitiria a adoção de terminais duplos especiais (TE) com raio igual a 2,0 metros, possibilitando deste modo a economia de custos destinados para amortecedores de choque.



### **3. Metodologia de Cálculo de Divergências**

O presente capítulo serve o intuito de descrever a metodologia de cálculo a adotar no dimensionamento de divergências, de modo a garantir a sua compatibilização planimétrica e altimétrica com a secção corrente da autoestrada e com o ramo de ligação.

A metodologia de cálculo utilizada no presente estudo teve igualmente por base as investigações da Engenheira Luísa Teles Fortes (2009). Procurou-se com a realização deste trabalho implementar os fundamentos de cálculo apresentados pela autora supracitada, efetivando o cálculo de dois ramos de ligação associados a uma curva circular à esquerda da autoestrada.

No entanto, existem algumas condicionantes que possibilitam o cálculo apropriado de zonas de divergência, as quais se referem no subcapítulo 3.1. Posteriormente, no subcapítulo 3.2, aborda-se a já referida metodologia de cálculo.

A metodologia de cálculo apresentada neste capítulo teve ainda por base todas as fórmulas e deduções abordadas nas disciplinas de Vias de Comunicação e Estradas e Arruamentos da Licenciatura em Engenharia Civil do ISEL.

#### **3.1. Condicionantes que influenciam o cálculo de divergências**

De acordo com a Norma de Interseções (JAE, 1990), as vias de desaceleração devem apresentar uma largura igual a 3,50 metros, independentemente da largura das restantes vias de circulação ou da velocidade base associada ao dimensionamento da secção corrente. Este valor é aproximadamente igual ao recomendado pela ASSHTO (2001) que corresponde a 12 pés ( $\approx$  3,60 metros).

No entanto, se a secção corrente da autoestrada contemplar um perfil transversal tipo dotado de vias de circulação com 3,75 metros de largura, esta

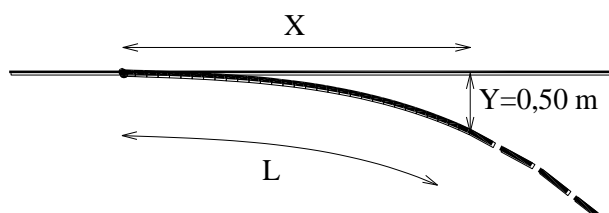
recomendação não deve ser tida em conta, pelo que se aconselha igualmente uma reformulação normativa subjacente a este tema, pois não se considera pertinente que numa faixa de rodagem em que as vias de circulação apresentem uma largura de 3,75 metros se materialize uma via de redução de velocidade com largura inicial inferior à da via de circulação adjacente.

Os Ramos de Saída devem contemplar uma largura inicial igual a 4,00 metros, o que implica uma transição adequada da largura da via de desaceleração, na extensão inicial da clotóide, equivalente a 0,25 ou 0,50 metros, dependendo da referida largura.

Segundo Teles Fortes (2009) “*Como o cálculo do ramo é efectuado sobre a linha que define o limite direito da faixa de rodagem, a largura de 4,00 metros é atingida quando a coordenada Y da clotóide tiver um valor idêntico ao valor diferencial entre a largura da via de desaceleração e a largura do ramo, isto é, 0,50 metros*”.

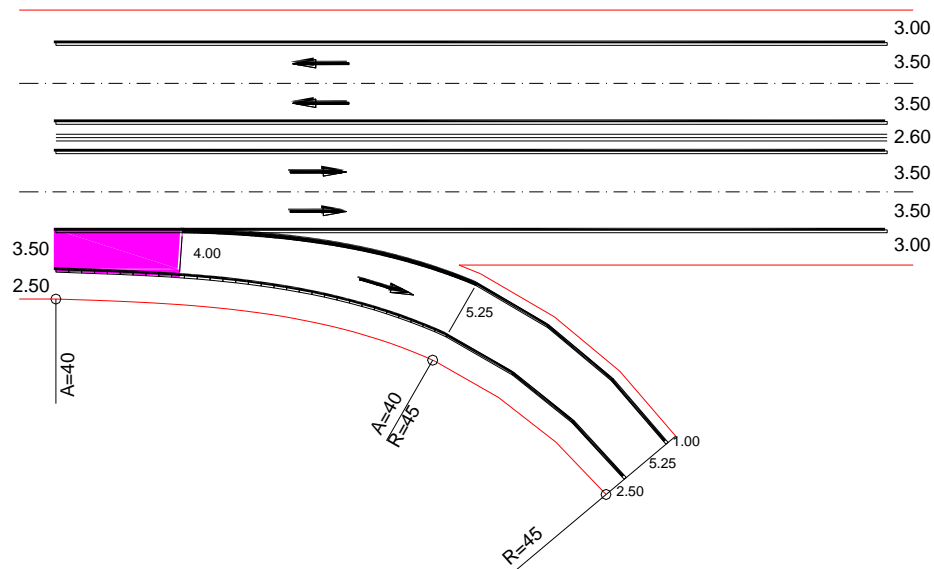
No entanto, esta situação apenas é admissível se o elemento geométrico da plena via for um alinhamento reto ou equivalente a este, pois na verdade corresponde a uma aproximação da perpendicular à coordenada planimétrica Y.

Nas Figuras 3.1 e 3.2 é possível verificar que somente após esta secção, se verificará o afastamento da guia esquerda do ramo em relação à secção corrente da autoestrada.



**Figura 3.1 – Troço de clotóide com afastamento  $Y = 0,50\text{m}$**

Fonte: Teles Fortes (2009)



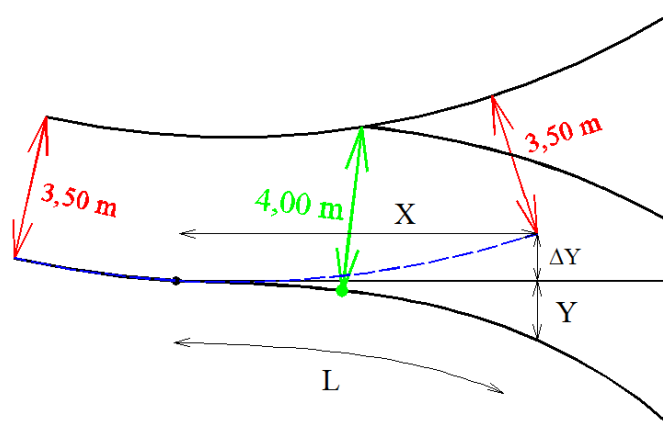
**Figura 3.2 – Zona de variação para a largura tipo do ramo**

Fonte: Teles Fortes (2009)

Porém, esta situação apenas se verifica num alinhamento reto, uma vez que a coordenada X relativa à clotóide desenvolve-se sobre a linha que define o limite direito da faixa de rodagem, ou seja, é coincidente com a mesma e porque a diferença entre o valor da coordenada Y relativa à clotóide e a distância medida segundo a perpendicular à diretriz do ramo é insignificante.

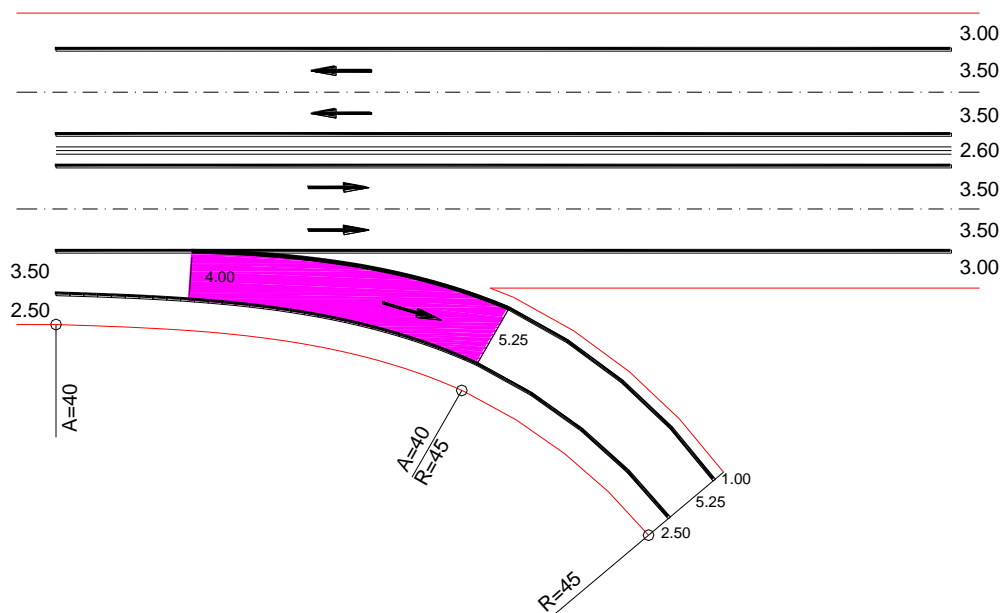
Nos casos em que o ramo de saída se localiza numa curva circular à esquerda é um pouco mais complexo de definir a secção a partir da qual se verifica o afastamento da guia esquerda do ramo, pois à medida que a clotóide se afasta (Y) a diretriz da secção corrente da autoestrada também se afasta ( $\Delta Y$ ). Assim, será necessário efetuar um cálculo iterativo até que a largura do ramo de ligação, medida segundo a perpendicular à sua diretriz, atinja o valor de 4,0 metros.

Na Figura 3.3 ilustra-se a situação referida.



**Figura 3.3 – Troço de clotoide com afastamento Y**

A largura do ramo deverá variar linearmente entre os 4,00 metros e o ponto onde a sobrelargura atinge o seu valor máximo ao longo da clotoide inicial, conforme se ilustra na Figura 3.4.



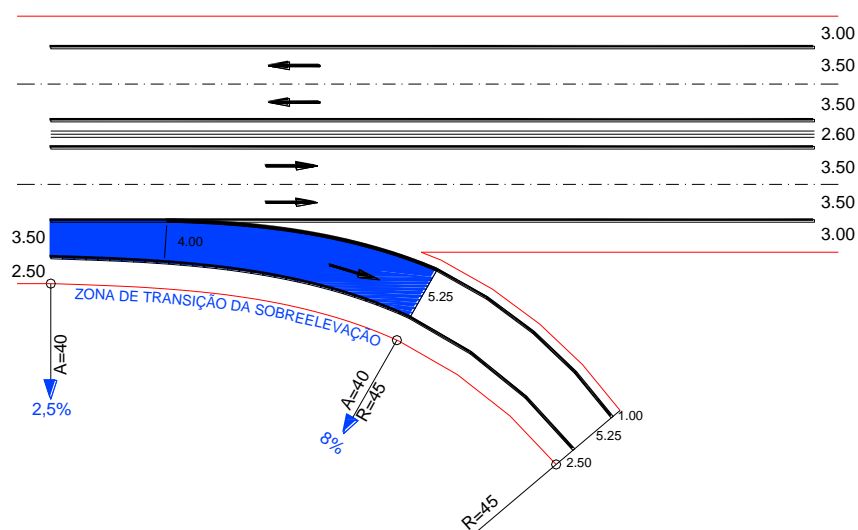
**Figura 3.4 – Sobrelargura no Ramo de Saída**

Fonte: Teles Fortes (2009)

Paralelamente à variação de largura da faixa de rodagem na curva de transição inicial, também ocorre a necessária transição de sobrelevação de modo a

permitir a circulação em segurança dos utilizadores nesta zona de conflito dos traçados rodoviários.

Na figura 3.5 é possível verificar a variação da sobrelevação em simultâneo com o alargamento da plataforma do ramo de ligação.



**Figura 3.5 – Zona de variação da sobrelevação**

Fonte: Teles Fortes (2009)

Conforme é possível constatar na Figura 3.6, existem diversas zonas de divergência mal dimensionadas em Portugal.



**Figura 3.6 – Exemplo de divergência mal dimensionada**

Fonte: Google Earth

Deste modo, é importante referenciar que a complexidade elevada do cálculo impede o projetista de delegar a responsabilidade do mesmo a técnicos, que mesmo com experiência em obra, não estão habilitados para o realizar (Teles Fortes, 2009).

### **3.2. Compatibilização planimétrica e altimétrica do traçado**

O primeiro passo para um correto dimensionamento da zona de divergência consiste na transferência das cotas e pontos coordenados correspondentes aos que foram obtidos no cálculo da própria secção corrente para o bordo direito da

faixa de rodagem da autoestrada. No entanto, ressalva-se que apesar das cotas se reportarem ao limite esquerdo da faixa de rodagem (rasante) as coordenadas planimétricas (M,P) e o ponto quilométrico (km) de referência são reportados ao eixo da secção corrente (diretriz), conforme se exemplifica na Figura 3.7.

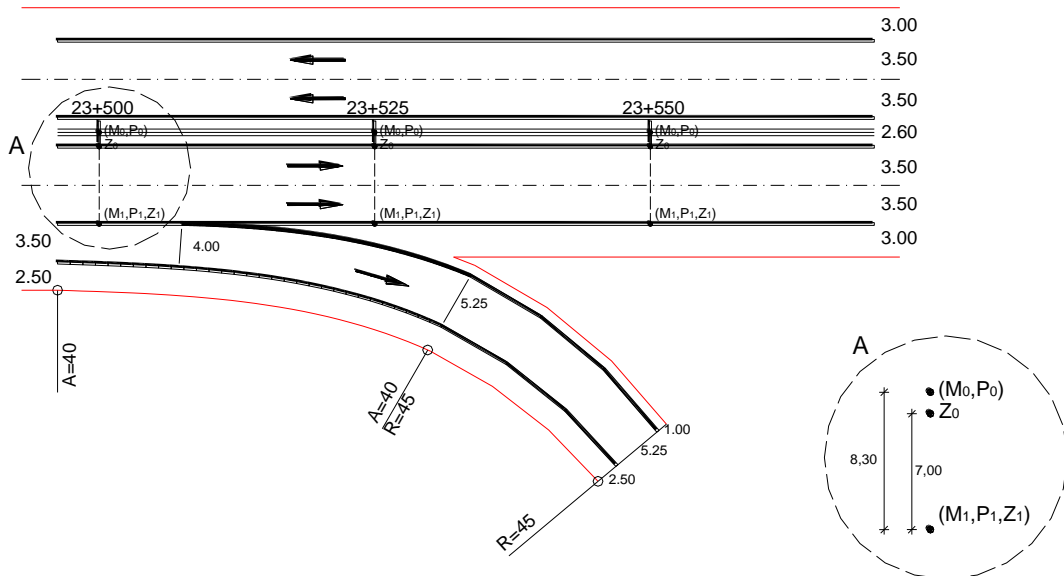


Figura 3.7 – Exemplo da passagem dos pontos de cálculo da secção corrente para o limite da faixa de rodagem (25 em 25 metros)

Fonte: Teles Fortes (2009)

Na Figura 3.8 ilustra-se a introdução dos elementos relativos a dois pontos adicionais equidistantes em 8,333 metros, entre os que caracterizam os perfis transversais característicos do traçado de 25 em 25 metros.

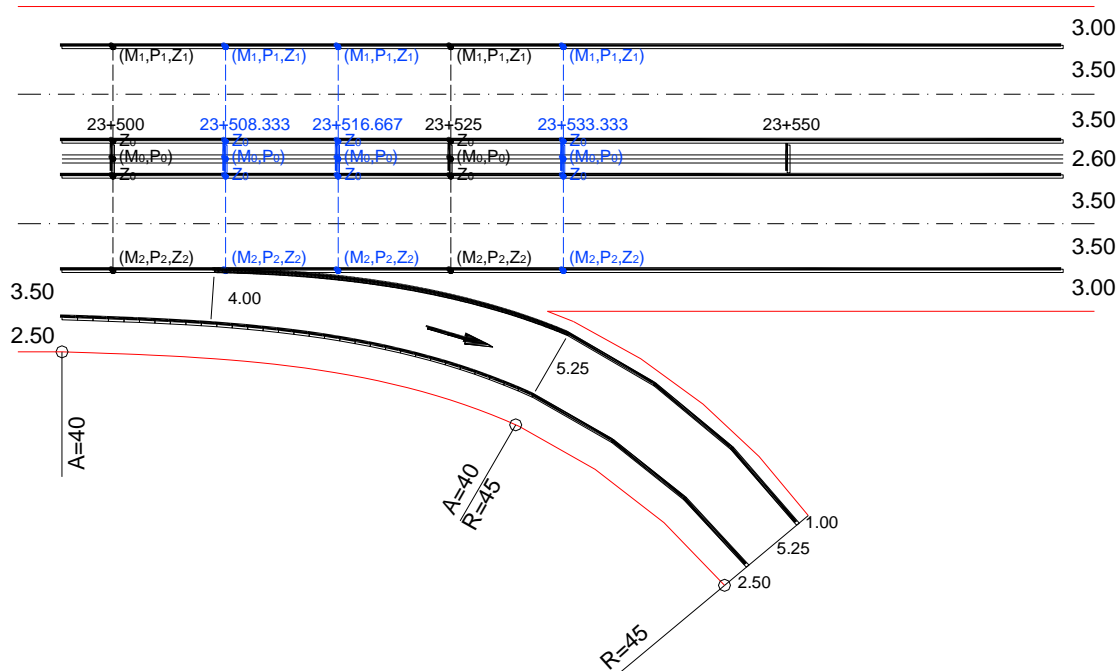


Figura 3.8 – Informação de 8,333 em 8,333 metros

Fonte: Teles Fortes (2009)

É através dos pontos  $(M_2, P_2, Z_2)$  que compatibilizaremos planimetricamente e altimetricamente toda a zona de divergência. Ou seja, tendo em consideração que o único elemento dimensional fixo é a largura da própria autoestrada, somente através de um processo iterativo de cálculo que considere a mesma é possível garantir a interligação do ramo de ligação à secção corrente da autoestrada.

Na Figura 3.9 ilustra-se a metodologia do processo iterativo a considerar.

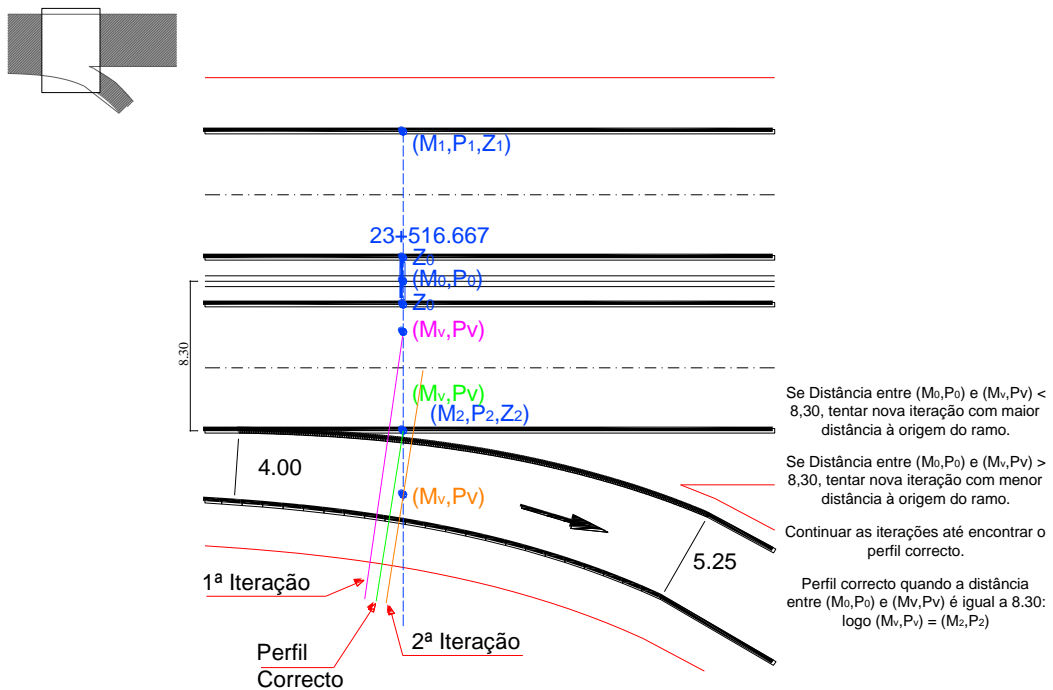


Figura 3.9 – Processo iterativo para concluir compatibilização da planimetria

Fonte: Teles Fortes (2009)

Somente após o processo iterativo se encontrar totalmente concluído, ou seja após estar determinado o ponto quilométrico do ramo de ligação que deve ser compatibilizado com o seu correspondente na autoestrada, é que será possível conhecer a sobrelargura dessa secção transversal, possibilitando, em definitivo, a caracterização planimétrica do ramo de saída nesses locais, conforme se ilustra na Figura 3.10 (Teles Fortes, 2009).

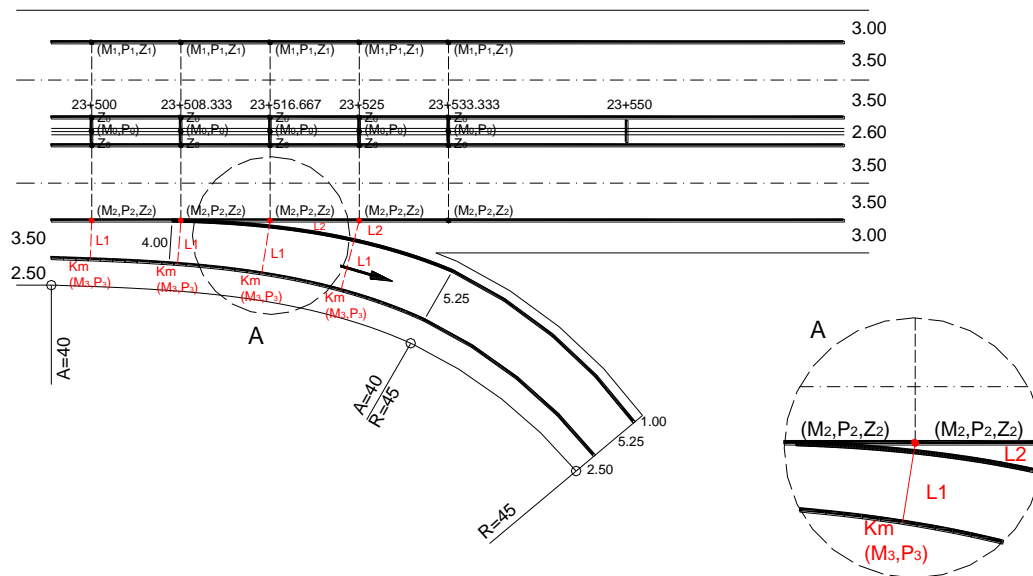


Figura 3.10 – Definição da largura do ramo associada a cada perfil

Fonte: Teles Fortes (2009)

O estudo altimétrico do ramo de ligação só poderá ser desenvolvido após estar concluída a compatibilização planimétrica com a plena via, uma vez que depende da mesma. No entanto, nem sempre esta prática prevalece. Sobre este assunto, Teles Fortes (2009) refere que se tem vindo a verificar, em muitos projetos, *“uma compatibilização planimétrica deficiente, o que conduz consequentemente a uma caracterização altimétrica que não corresponde à situação real e que poderá originar a incorrecta construção da zona de divergência e da cunha que lhe está associada”*.

Concluída a compatibilização planimétrica, e considerando as recomendações relativas ao valor máximo que a diferença de inclinações transversais pode adotar, é possível condicionar a rasante do ramo com o intuito de que a variação de sobrelevação ao longo da zona de divergência não provoque desníveis altimétricos incompatíveis com a segurança rodoviária.

Seguidamente ilustra-se na Figura 3.11 a informação relativa à inclinação transversal e às cotas da zona de divergência.

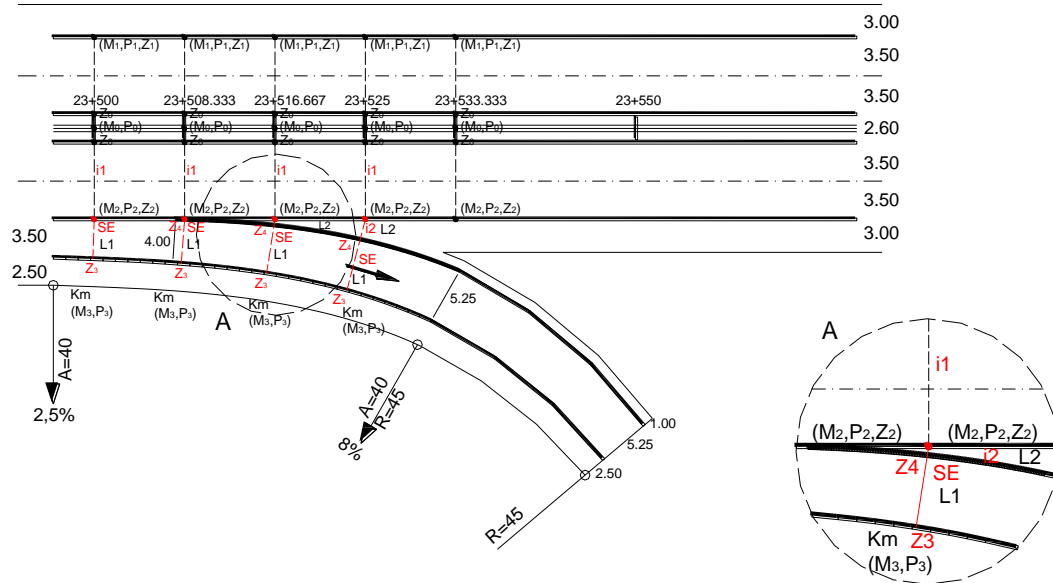


Figura 3.11 – Definição da sobrelevação associada a cada perfil do ramo

Fonte: Teles Fortes (2009)

Conforme já referido, as características da autoestrada, na zona do ramo de saída, poderão ser de tal forma condicionadoras que se conclui, após a compatibilização planimétrica, não ser possível garantir a compatibilização altimétrica apropriada. Nestes casos, será necessário deslocar o ponto considerado como o início do cálculo planimétrico do ramo para uma zona mais favorável do traçado da plena via.

Uma zona de divergência corretamente referenciada, permite identificar completamente três pontos notáveis na planta de pormenor, nomeadamente os pontos relativos ao início do cálculo do ramo, ao início do ramo ( $L = 4,0$  metros) e ao início da separação física do ramo, conforme se ilustra a Figura 3.12. Pode, ainda, identificar-se o ponto referente à intersecção das duas bermas (ponto notável a amarelo).

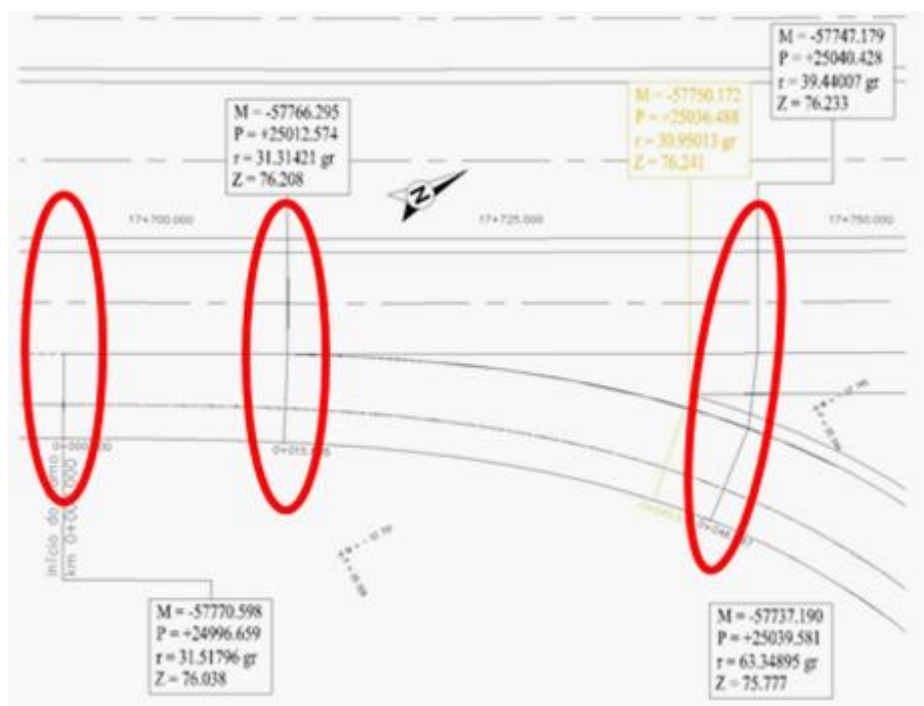


Figura 3.12 – Pontos notáveis para a correta definição de uma divergência

Em suma, a caracterização das zonas de divergência passa obrigatoriamente por uma “*sequência coerente de cálculos*” que incluem a compatibilização planimétrica, recorrendo a um processo iterativo, que precede ao cálculo altimétrico que a esta tem de se adequar. A informação sobre o projeto, incluindo os cálculos e as peças escritas e desenhadas deve ser clara, concisa e completa (Teles Fortes, 2009). No Anexo A apresenta-se algumas referências relativamente à correta apresentação de peças desenhadas.

#### 4. Casos de Estudo

No presente capítulo serão apresentados dois casos associados à temática desta dissertação, nomeadamente o estudo da divergência entre duas vias que curvam em sentidos contrários.

No primeiro caso o valor do raio da curva circular da secção corrente da autoestrada será igual a 5000 metros, dispensando a adoção de sobreelevação. Porém, na segunda hipótese de estudo o valor do raio da plena via será igual ao valor do raio absoluto recomendado nas Normas de Traçado (Inir, 2011) para uma velocidade base igual a 120 km/h, 700 metros, onde a sobreelevação associada a este raio assume o valor de 7%.

Em ambas as situações têm-se o objetivo de garantir que toda a cunha da divergência esteja desimpedida até uma largura mínima no nariz físico de 6m a 9m.

Por outro lado, a zona de divergência terá de estar devidamente compatibilizada planimétrica e altimetricamente com a secção corrente da autoestrada e com o ramo de saída.

Conforme já referido, a velocidade base considerada para a autoestrada tem o valor de 120 km/h, o que implica uma velocidade de tráfego de 130 km/h. Deste modo, os raios planimétricos adotados correspondem ao valor do raio a partir do qual é dispensada a sobreelevação e ao valor do raio absoluto recomendado, 5000 e 700 metros, respetivamente.

Ainda, neste âmbito, importa referir que o ramo de saída será do tipo indireto, cuja velocidade base recomendada é igual a 40 km/h. Relativamente ao raio da curva circular do *loop*, o valor será igual a 55 metros, assim como o parâmetro das clotóides de entrada e de saída, com uma sobrelargura igual a 1,00 metro e

uma sobrelevação de 7%. A via de circulação do ramo de ligação será ladeada por uma berma direita com 2,50 metros e uma berma esquerda de 1,0 metro. Teve-se por base as listagens de cálculo referentes à autoestrada A17 e ao Restabelecimento 16 que atravessa a mesma, as quais foram adquiridas na disciplina de Estradas e Arruamentos no âmbito do trabalho final da referida cadeira, que consistia no projeto de um nó de ligação.

Nas Figuras 4.1, 4.2 e 4.3 ilustra-se o Nó de Ligação materializado na disciplina de Estradas e Arruamentos e que posteriormente, na disciplina de Projeto Avançado de Traçado, viu compatibilizado o *loop* de entrada na secção corrente, identificando-se, desde já, o ramo indireto de saída da autoestrada sobre o qual recai o presente estudo.

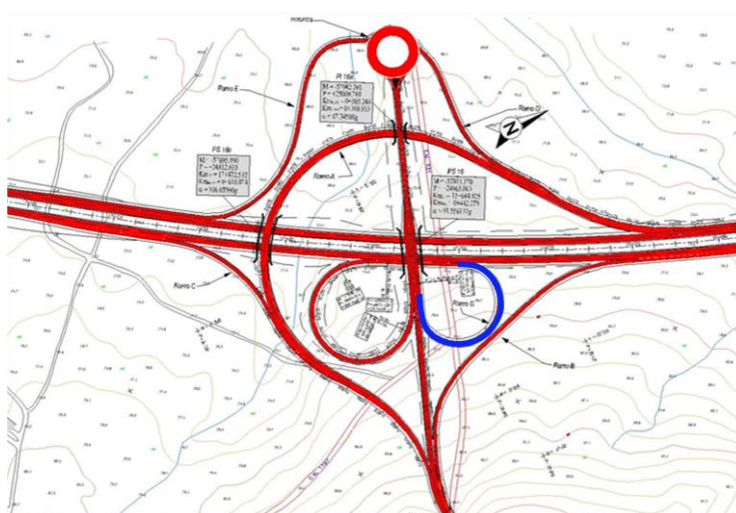


Figura 4.1 – Planta Geral do Nó original



Figura 4.2 – Planta Geral do Nó (solução associada a um raio de 5000m)

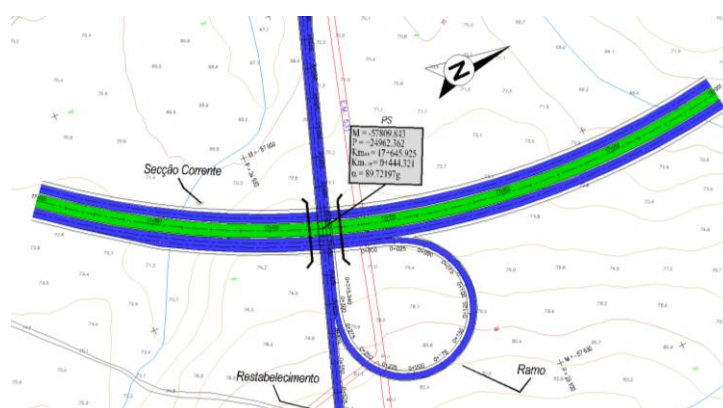


Figura 4.3 – Planta Geral do Nó (solução associada a um raio de 700m)

Tendo-se arbitrado como ponto de partida para todo o cálculo do estudo as coordenadas planimétricas, o rumo e a cota entre outros elementos indicados seguidamente no Quadro 4.1.

**Quadro 4.1 – Elementos planimétricos e altimétricos arbitrados como ponto de partida de cálculo**

<i>Elementos planimétricos</i>					
Km	M	P	Rumo da AE	Raio da curva circular	Rumo do restabelecimento
17+525,679	-57868,940	24858,378	33,66251 gr	700 ou 5000	121,82607 gr
<i>Elementos altimétricos</i>					
Km	Z	Inclinação longitudinal inicial	Bissetriz	Raio da curva convexa	Inclinação longitudinal final
17542,589	75,089	1,115%	0,866	25 000	-0,550%

Planimetricamente, fixou-se o ponto notável das listagens da autoestrada A17 situado ao km 17+525,679, correspondente ao início de uma curva circular à esquerda e que contempla as coordenadas e rumo identificados no quadro acima apresentado. Porém, o raio associado à curva circular não corresponde aos identificados para os dois casos de estudo. Ou seja, não se considerou mais

nada para além do ponto planimétrico identificado, tendo-se alterado posteriormente o valor do raio associado à curva circular à esquerda.

Relativamente à altimetria da autoestrada, na zona do ramo de saída, é composta por uma concordância vertical convexa, cujo valor do raio é igual a 25000 metros. Nos Anexos E, F e G é possível verificar os elementos geométricos da plena via e do restabelecimento.

Sendo o perfil transversal tipo constituído por duas faixas de rodagem com duas vias de circulação de 3,75 metros de largura, bermas direita e esquerda pavimentadas, com 3,00 e 1,00 metros de largura e um separador central de 11,50 metros. No Anexo Q é possível verificar a peça desenhada correspondente aos perfis transversais tipo.

Já o traçado do restabelecimento é constituído, na zona do ramo de saída, por um alinhamento reto, rumo igual a 121,82607 grados. A sua rasante é composta por duas concordâncias verticais, uma côncava de raio igual a 1600 metros seguida de uma curva vertical convexa de raio igual a 2000 metros. O perfil transversal tipo é constituído por uma faixa de rodagem com duas vias de circulação de 3,00 metros ladeadas por bermas direitas de 1 metro.

Salienta-se, ainda, que o ramo de ligação deverá respeitar os parâmetros altimétricos recomendados na norma de traçado, para a velocidade base de 40 km/h. No Quadro 4.2 apresentam-se os referidos parâmetros.

**Quadro 4.2 – Parâmetros altimétricos para a velocidade base de 40 km/h**

<i>Vel. Base (VB – km/h)</i>	<i>Vel. Tráfego (VT – km/h)</i>	<i>Inclinação máx. (imáx – %)</i>	<i>Raio da curva convexa (m)</i>	<i>Raio da curva côncava (m)</i>	<i>Desenvolvimento mínimo normal (m)</i>
40	50	8	1500	800	60

Fonte: Norma de Traçado (Inir, 2011)

#### **4.1. Curva à esquerda de $R = 5\ 000$ metros**

Uma curva circular cujo valor do seu raio é igual a 5000 metros dispensa curvas de transição, uma vez que não necessita de considerar sobrelevação. Por outras palavras, pode afirmar-se que o seu comportamento será aproximado ao de um alinhamento reto.

Importa, lembrar que o dimensionamento da via de desaceleração foi efetuado com base na Norma da AASHTO (2001). O bisel assume um valor igual a 75 metros e o comprimento da via de desaceleração (L) será de 175 metros, de acordo com a Figura 2.3, contabilizando uma extensão total igual a 250 metros.

O início da diretriz do ramo localiza-se na guia pintada associada à berma direita da via de desaceleração da autoestrada, com 3,75 metros de largura, e termina na guia pintada relativa à berma direita da via de aceleração do restabelecimento, com 3,50 metros de largura.

Deste modo, é possível verificarmos que é necessária uma variação da largura do ramo de ligação, a qual é garantida através das duas curvas de transição (clotóides) previstas no início e fim da sua diretriz.

No início da diretriz, varia-se de 3,75 para 5,00 metros de largura no início da curva circular. Após a curva circular varia-se até os 4,00 metros de largura no nariz da convergência com o restabelecimento e após a cunha diminui até os 3,50 metros de largura no final do ramo.

Na continuação do dimensionamento do ramo fez-se uma primeira aproximação para a escolha do ponto quilométrico relativo à diretriz da autoestrada, cujo elemento geométrico é uma curva circular de raio igual a 5000 metros, definindo as suas coordenadas (M, P) e o respetivo rumo. Em seguida determinou-se as coordenadas (M,P) do ponto inicial do ramo, o qual tem o mesmo rumo da

diretriz da secção corrente da plena via, uma vez que corresponde à mesma secção transversal.

A distância transversal entre a diretriz da autoestrada e o eixo de cálculo do ramo é igual a 17,75 metros.

As expressões utilizadas para a determinação das coordenadas e restantes elementos planimétricos foram obtidos através de expressões matemáticas adquiridas na disciplina de Estradas e Arruamentos.

Nos Quadros 4.2 e 4.3 é possível observar as coordenadas planimétricas e os rumos relativos ao início do ramo de ligação e o seu correspondente na diretriz da secção corrente da autoestrada.

**Quadro 4.2 – Coordenadas planimétricas e rumo da curva circular da autoestrada na zona do ramo de saída**

	<i>Ponto de tangência – T1</i>	<i>Vértice</i>	<i>Centro</i>	<i>Ponto de tangência – T2</i>
<i>M</i>	-57868,940	-57753,804	-62186,083	-57657,096
<i>P</i>	24858,378	25055,440	27380,734	25262,179
<i>r</i>	33,662508	<b>R = -5000,000</b>		27,85456
<i>km</i>	17525,679			17981,834
<i>R<sub>berma</sub></i>	-5018			

**Quadro 4.3 – Coordenadas planimétricas e rumo do ponto inicial de cálculo do ramo de saída**

<b>Km<sub>AEx</sub></b>	17694,111
<b>d = Km<sub>x</sub> - Km<sub>T1</sub></b>	168,432
<b><math>\alpha x = D \cdot 400 / (2 \cdot \pi \cdot R)</math></b>	-2,14454
<b><math>r'x = rT1 + \alpha x</math></b>	31,51796
<b><math>Mx = Mc + R_{berma} \cdot \sin (rx - 100)</math></b>	-57770,598
<b><math>Px = Pc + R_{berma} \cdot \cos (rx - 100)</math></b>	24996,659

Seguidamente definiu-se o ponto do fim do ramo na diretriz do restabelecimento, definindo-se as coordenadas do ponto quilométrico (M, P) e o respetivo rumo.

Para a determinação do ponto final da diretriz do ramo procedeu-se do modo explicado anteriormente, embora a uma distância transversal de 6,50 metros (1 via de circulação do restabelecimento + 3,50 metros de largura da via de aceleração). No Quadro 4.4 apresentam-se as coordenadas e rumo relativos ao final do ramo de ligação.

**Quadro 4.4 – Coordenadas planimétricas e rumo do ponto final de cálculo do ramo de saída e da diretriz do restabelecimento**

	Início do alinhamento reto	Fim do alinhamento reto	Ponto na diretriz	Ponto fim do loop
kmRest	211,854	657,384	503,223	503,223
M	-58028,781	-57609,180	-57754,369	-57752,124
P	25040,503	24890,731	24942,555	24948,676
r	121,82607			
d	291,369			
Lfaixa	6,500			

O procedimento adotado no cálculo do loop ( $A + D_{\text{curva circular}} + A$ ), consiste em determinar as coordenadas do centro da curva circular partindo da secção corrente da autoestrada, com os parâmetros arbitrados para as clotóides e para o raio da referida curva, nomeadamente  $A = 55,000$  m e  $R = 55,000$  m.

De modo idêntico, determinou-se as coordenadas do centro da curva circular partindo do restabelecimento, com os mesmos parâmetros (clotóides de parâmetros iguais).

Importa, referir, que as curvas de transição no seu início contemplam um raio infinito e variam ao longo do seu desenvolvimento até ao raio pretendido.

O esquema de cálculo para a determinação das coordenadas do ramo presente no Anexo B.

Nos Quadros 4.5 e 4.6 apresentam-se os parâmetros relativos às curvas de transição de entrada e de saída do ramo de ligação.

**Quadro 4.5 – Parâmetros da clotóide de entrada – autoestrada**

$r_1$	$M_1$	$P_1$	R	A	$\alpha_1$	$r_{f1}$	C	$\varphi$
31,51796	-57770,598	24996,659	55	55	31,83099	63,34895	1	0,500
$\alpha_2$	x	y	$L_1$	$M_{tf} \equiv M_2$	$P_{tf} \equiv P_2$	$M_c$	$P_c$	$r'_{f1}=r_{f1}$
226,64561	53,641	9,004	55	-57737,190	25039,581	-57707,246	24993,447	63,34895

**Quadro 4.6 – Parâmetros da clotóide de saída – restabelecimento**

$r_4$	$M_4$	$P_4$	R	A	$\alpha_3$	$r_{i3}$	C	$\varphi$
321,82607	-57752,184	24948,676	55	55	-31,83099	353,65706	-1	0,500
$\alpha_2$	X	y	$L_2$	$M_{ti} \equiv M_3$	$P_{ti} \equiv P_3$	$M_c$	$P_c$	$r'_{i3}=r_{i3}$
226,64561	53,641	9,004	55	-57698,638	24939,124	-57707,246	24993,530	353,65706

Posteriormente, determinou-se a diferença (distância entre os pontos determinados) entre os dois centros, até que coincidissem. Deste modo a curva estaria corretamente dimensionada.

(4.1)

$$d = \sqrt{(M_{C2} - M_{C1})^2 + (P_{C2} - P_{C1})^2}$$

$$d_M = M_{C2} - M_{C1}$$

$$d_P = P_{C2} - P_{C1}$$

Para que os dois centros coincidissem recorreu-se a várias iterações (deslocamento dos pontos de início e de fim do ramo), de modo a que a distância dos dois centros fosse inferior a 0,001 metros.

Ao obter-se uma diferença de coordenadas dos dois centros da curva circular igual a  $d_M = \pm 0,00001$  metros e  $d_P = \pm 0,00001$  metros, deu-se por concluído o processo iterativo.

Em seguida calculou-se toda a curva desde o ponto de início, encontrado no final das iterações, até ao final, cujo último ponto é o obtido no processo iterativo.

No Anexo C encontra-se pormenorizado o método de cálculo da curva circular. E no Anexo D a pormenorização do cálculo da rasante do ramo de ligação.

Por último elaborou-se a tabela da piquetagem da totalidade da diretriz do ramo, contendo as coordenadas dos pontos equidistantes de 8,333 metros e os respetivos rumos e dos pontos notáveis e os parâmetros dos elementos que compõem a mesma. Os parâmetros planimétricos do ramo de saída apresentam-se no Anexo H e I.

No que se refere à planimetria o cálculo encontra-se concluído, faltando apenas a definição da rasante para garantirmos a execução da diretriz do ramo.

Para a velocidade base de 40 km/h a sobrelevação pode variar 4,7% a cada 20,000 metros de extensão. De modo a determinar a variação da sobrelevação recorreu-se à expressão parabólica:

(4.2)

$$y = \Delta SE \cdot \frac{x^2}{L^2} \cdot \left( 3 - \frac{2x}{L} \right)$$

Em que:

$\Delta SE$  – variação da sobrelevação pretendida;

L – extensão em que é feita a variação de sobrelevação;

X – distância entre o ponto de início da variação de sobrelevação e o ponto em que se pretende saber o valor da mesma.

Y – valor de sobrelevação no ponto pretendido.

A principal vantagem ao adotar a solução parabólica é o facto de se realizar rapidamente a transição de inclinação transversal entre os -2,5% e os 2,5%, zona onde é hábito a acumulação de águas pluviais e responsável pela falta de aderência pneu do veículo/pavimento. Ainda neste âmbito, refere-se que os valores de inclinações mais reduzidas estarão sempre associados à zona de divergência pelo que se optou por uma variação de sobrelevação parabólica, a favor da segurança rodoviária.

O Quadro 4.7 apresenta os valores da sobrelevação na clotóide de entrada do ramo de ligação, sendo que o Quadro 4.8 revela os valores da sobrelevação na clotóide de saída.

**Quadro 4.7 – Valores da sobrelevação na clotóide de entrada do ramo**

Km	SE (%)
0+000,000	2,50
0+005,884	2,64
0+014,135	3,24
0+015,885	3,41
0+022,227	4,12
0+030,229	5,08
0+037,881	5,96
0+043,422	6,49
0+048,243	6,81
0+048,751	6,84
0+050,000	6,90
0+055,000	7,00

**Quadro 4.8 – Valores da sobrelevação na clotóide de saída do ramo**

<b>Km</b>	<b>SE (%)</b>
0+305,808	2,50%
0+300,712	2,61%
0+292,471	3,17%
0+285,088	3,93%
0+284,327	4,02%
0+276,346	4,99%
0+268,552	5,89%
0+261,887	6,53%
0+261,246	6,58%
0+255,808	6,90%
0+250,808	7,00%

A diferença algébrica máxima – diferença máxima admissível entre a inclinação transversal da estrada principal e do ramo de ligação, nas zonas de compatibilização do traçado – recomendada na Norma de Nós de Ligação para velocidades compreendidas entre os 40 e os 50 km/h, situa-se entre os 5,0% e 6,0% de inclinação.

Quer a autoestrada quer o restabelecimento consideraram um valor de inclinação transversal igual a 2,5% para o exterior da plataforma, sendo que a curva circular do ramo de ligação tem 7,0% de sobrelevação. A secção corrente da autoestrada apesar de se encontrar numa curva circular à esquerda, apresenta um raio que dispensa sobrelevação.

Nos pontos de compatibilização entre a autoestrada e o ramo, associados aos perfis equidistantes de 8,333 metros, definiu-se o ponto quilométrico e a correspondente cota na rasante.

Através da distância entre a rasante da plena via e a do ramo, a inclinação longitudinal de ambos e a inclinação transversal no ponto quilométrico

correspondente, determina-se o valor das cotas do ramo, desde o seu início até ao nariz da divergência (final da cunha) – ponto onde o ramo se torna independente.

Procedimento idêntico foi adotado na compatibilização do ramo com o restabelecimento.

O cálculo foi efetuado segundo as expressões indicadas de seguida.

(4.3)

$$\begin{aligned}Z_{bermaesq.ramo} &= Z_{AE} - L_{AE} \times SE_{AE} \\Z_{ramo} &= Z_{bermaesq.ramo} - L_{ramo} \times SE_{ramo}\end{aligned}$$

Em que:

$Z_x$  – cota num determinado ponto X;

L – largura/distância entre o ponto com cota conhecida e o ponto pretendido;

Se – sobreelevação.

De modo a concluir-se a compatibilização do ramo com as plataformas da autoestrada e do restabelecimento (zona de cotas deduzidas das infraestruturas principais), é necessário analisar o comportamento da sobrelargura do ramo de ligação.

A utilização da sobrelargura, função do raio da curva e do comprimento do veículo, é necessária sempre que a trajetória dos veículos ao descreverem uma curva circular ocupem uma largura superior à da via de circulação.

A sobrelargura correspondente a um raio igual a 55 metros é de 1,00 metro e a sua variação processa-se ao longo da clotóide, no extradorso da via de circulação, desde que o ramo apresenta uma largura de 4,00 metros até ao início da curva circular.

Os Quadros 4.9 e 4.10 apresentam os valores da sobrelargura ao longo da clotóide.

**Quadro 4.9 – Variação da sobrelargura na clotóide de entrada**

<b>Km</b>	<b>SI (m)</b>
0+000,000	3,750
0+005,884	3,765
0+014,135	3,928
0+015,885	4,000
0+022,227	4,163
0+030,229	4,367
0+037,881	4,562
0+043,422	4,704
0+048,243	4,827
0+048,751	4,840
0+050,000	4,872
0+055,000	5,000

**Quadro 4.10 – Variação da sobrelargura na clotóide de saída**

<b>Km</b>	<b>SI (m)</b>
0+305,808	3,500
0+300,712	3,507
0+292,471	3,631
0+285,088	4,000
0+284,327	4,022
0+276,346	4,255
0+268,552	4,482
0+261,887	4,677
0+261,246	4,677
0+255,808	4,854
0+250,808	5,000

Seguidamente, deu-se início ao cálculo do perfil longitudinal do ramo.

Por último, elaboraram-se as peças desenhadas correspondentes à planta geral do *loop* (Anexo R), à planta e perfil longitudinal (Anexo S), assim como à planta de pormenor na zona de divergência e convergência do ramo indireto (Anexo U), onde se apresenta toda a informação necessária para a correta materialização do referido ramo.

Importa, ainda, referir que uma divergência entre duas vias que curvam em sentidos contrários não apresenta qualquer problema, desde que o raio da curva circular da plena via seja igual ou superior a 5 000 metros, uma vez que não é necessário contemplar sobreelevação. Por outras palavras, a divergência apresenta apenas uma quebra na inclinação e diferenças algébricas muito reduzidas, o que lhe confere todas as condições na eventual recuperação de veículos descontrolados. Nos Anexos J e K é possível verificar o cálculo auxiliar associado às diferenças algébricas da divergência e convergência, respetivamente.

#### **4.2. Curva à esquerda de R = 700 metros**

Uma curva circular cujo valor do seu raio é igual a 700 metros não dispensa curvas de transição, uma vez que necessita de considerar sobreelevação igual a 7%.

Uma vez que a metodologia de cálculo é em tudo semelhante ao dimensionamento para o raio igual a 5000 metros, apenas se apresentaram os quadros com os diversos parâmetros associados a este novo cálculo.

Nos Quadros 4.11 e 4.12 é possível observar as coordenadas planimétricas e os rumos relativos ao início do ramo de ligação e o seu correspondente na diretriz da secção corrente da autoestrada.

**Quadro 4.11 – Coordenadas planimétricas e rumo da curva circular da autoestrada na zona do ramo de saída ( $R_{AE}=700m$ )**

	<i>Ponto de tangência – T1</i>	<i>Vértice</i>	<i>Centro</i>	<i>Ponto de tangência – T2</i>
<i>M</i>	-57868,940	-57749,629	-58473,340	-57778,618
<i>P</i>	24858,378	25062,685	25211,508	25297,308
<i>r</i>	33,66251	<b>R = -700,000</b>		-7,822819
<i>km</i>	17525,679			17981,834
<i>R<sub>berma</sub></i>	-718			

**Quadro 4.12 – Coordenadas planimétricas e rumo do ponto inicial de cálculo do ramo de saída ( $R_{AE}=700m$ )**

<b>Km<sub>AE<sub>x</sub></sub></b>	17678,319
<b>d = Km<sub>x</sub> - Km<sub>T1</sub></b>	152,640
<b><math>\alpha x = D \cdot 400 / (2 \cdot \pi \cdot R)</math></b>	-13,88195
<b><math>r'x = rT1 + \alpha x</math></b>	31,83099
<b><math>Mx = Mc + R_{berma} \cdot \text{sen} (rx - 100)</math></b>	-57806,859
<b><math>Px = Pc + R_{berma} \cdot \text{cos} (rx - 100)</math></b>	24997,492

Seguidamente definiu-se o ponto do fim do ramo na diretriz do restabelecimento, definindo-se as coordenadas do ponto quilométrico (M, P) e o respetivo rumo.

No Quadro 4.13 apresentam-se as coordenadas e rumo relativos ao final do ramo de ligação.

**Quadro 4.13 – Coordenadas planimétricas e rumo do ponto final de cálculo do ramo de saída e da diretriz do restabelecimento ( $R_{AE}=700m$ )**

	Início do alinhamento reto	Fim do alinhamento reto	Ponto na diretriz	Ponto fim do loop
$km_{Rest}$	211,854	657,384	482,404	482,404
M	-58028,781	-57609,180	-57773,977	-57771,791
P	25040,503	24890,731	24949,553	24955,675
r	121,826070			
d	270,550			
$L_{faixa}$	6,500			

O procedimento adotado no cálculo do loop ( $A + D_{curva\ circular} + A$ ), consiste em determinar as coordenadas do centro da curva circular partindo da secção corrente da autoestrada, com os parâmetros arbitrados para as clotóides e para o raio da referida curva, nomeadamente  $A = 55,000\ m$  e  $R = 55,000\ m$ .

De modo idêntico, determinou-se as coordenadas do centro da curva circular partindo do restabelecimento, com os mesmos parâmetros (clotóides de parâmetros iguais).

Importa, referir, que as curvas de transição no seu início contemplam um raio infinito e variam ao longo do seu desenvolvimento até ao raio pretendido.

Nos Quadros 4.14 e 4.15 apresentam-se os parâmetros relativos às curvas de transição de entrada e de saída do ramo de ligação.

**Quadro 4.14 – Parâmetros da clotóide de entrada – AE ( $R_{AE}=700m$ )**

$r_1$	$M_1$	$P_1$	R	A	$\alpha_1$	$r_{f1}$	C	$\varphi$
19,78056	-57789,732	24991,989	55	55	31,83099	51,61155	1	0,500
$\alpha_2$	x	y	$L_1$	$M_{tr} \equiv M_2$	$P_{tr} \equiv P_2$	$M_c$	$P_c$	$r'_{f1}=r_{f1}$
289,99750	53,641	9,004	55	-57764,748	25040,308	-57726,854	25000,445	51,61155

**Quadro 4.15 – Parâmetros da clotóide de saída – Rest. ( $R_{AE}=700m$ )**

$r_4$	$M_4$	$P_4$	R	A	$\alpha_3$	$r_{i3}$	C	$\varphi$
321,82607	-57771,791	24955,675	55	55	-31,83099	89,99508	-1	0,500
$\alpha_2$	X	y	$L_2$	$M_{ti} \equiv M_3$	$P_{ti} \equiv P_3$	$M_c$	$P_c$	$r'_{i3}=r_{i3}$
289,99750	53,641	9,004	55	-57718,245	24946,123	-57726,854	25000,445	89,99508

Posteriormente, determinou-se a diferença (distância entre os pontos determinados) entre os dois centros, até que coincidissem, conforme efetuado no subcapítulo 4.1.

Nos Anexos L, M e N é possível observar os parâmetros planimétricos da autoestrada ( $R=700m$ ) e do ramo de ligação.

O Quadro 4.16 apresenta os valores da sobreelevação na clotóide de entrada do ramo de ligação, sendo que o Quadro 4.17 revela os valores da sobreelevação na clotóide de saída.

**Quadro 4.16 – Valores da SE na clotóide de entrada do ramo ( $R_{AE}=700m$ )**

Km	SE (%)
0+000,000	-7,00%
0+005,100	-6,66%
0+013,149	-4,98%
0+013,499	-4,88%
0+021,766	-2,16%
0+025,000	-0,95%
0+029,813	0,88%
0+037,486	3,65%
0+040,009	4,45%
0+044,944	5,77%
0+045,327	5,85%
0+045,724	5,94%
0+050,000	6,67%
0+055,000	7,00%

**Quadro 4.17 – Valores da SE na clotóide de saída do ramo ( $R_{AE}=700m$ )**

Km	SE (%)
0+315,949	2,50%
0+315,019	2,50%
0+306,735	2,84%
0+300,000	3,42%
0+298,537	3,57%
0+295,237	3,93%
0+290,466	4,50%
0+282,602	5,46%
0+278,953	5,87%
0+278,667	5,90%
0+275,091	6,26%
0+275,000	6,27%
0+271,378	6,58%
0+271,194	6,59%
0+265,949	6,90%
0+260,949	7,00%

A diferença algébrica máxima – diferença máxima admissível entre a inclinação transversal da estrada principal e do ramo de ligação, nas zonas de compatibilização do traçado – recomendada na Norma de Nós de Ligação para velocidades compreendidas entre os 40 e os 50 km/h, situa-se entre os 5,0% e 6,0% de inclinação.

A autoestrada nesta situação já necessita de sobreelevação, adotando o valor correspondente a +7%, onde a pendente é para o separador central. Já o restabelecimento considera um valor de inclinação transversal igual a 2,5% para o exterior da plataforma, sendo que a curva circular do ramo de ligação tem 7,0% de sobreelevação.

A compatibilização do ramo de ligação com a autoestrada e o restabelecimento foi efetuada de acordo com o já referido no subcapítulo 4.1. No entanto, continua a ser necessário analisar o comportamento da sobrelargura do ramo de ligação.

Deste modo, os Quadros 4.18 e 4.19 contemplam os valores de sobrelargura a materializar nas clotóides de entrada e saída para o raio igual a 700 metros.

**Quadro 4.18 – Variação da sobrelargura na clotóide de entrada ( $R_{AE}=700m$ )**

Km	SI (m)
0+000,000	3,750
0+005,100	3,774
0+013,149	4,000
0+013,499	4,008
0+021,766	4,206
0+025,000	4,283
0+029,813	4,398
0+037,486	4,582
0+040,009	4,642
0+044,944	4,760
0+045,327	4,769
0+045,724	4,778
0+050,000	4,881
0+055,000	5,000

**Quadro 4.19 – Variação da sobrelargura na clotóide de saída ( $R_{AE}=700m$ )**

Km	SI (m)
0+315,949	3,500
0+315,019	3,501
0+306,735	3,543
0+300,000	3,727
0+298,537	3,795
0+295,237	4,000
0+290,466	4,139
0+282,602	4,369
0+278,953	4,475
0+278,667	4,483
0+275,091	4,588
0+275,000	4,590
0+271,378	4,696
0+271,194	4,701
0+265,949	4,854
0+260,949	5,000

Seguidamente, deu-se início ao cálculo do perfil longitudinal do ramo.

Por último, elaboraram-se as peças desenhadas correspondentes à planta geral do *loop* (Anexo R), à planta e perfil longitudinal (Anexo T), assim como à planta de pormenor na zona de divergência e convergência do ramo indireto (Anexo V), onde se apresenta toda a informação necessária para a correta materialização do referido ramo.

Importa, ainda, referir que a divergência relativa ao raio da curva circular da plena via igual a 700 metros é mais difícil de compatibilizar pois a secção corrente da autoestrada apresenta uma pendente contrária à do ramo de ligação, situação que implica a adoção de quebras adicionais para ser possível garantir as diferenças algébricas máximas recomendadas na norma de Nós de Ligação. Nos Anexos O e P é possível verificar o cálculo auxiliar associado às diferenças algébricas da divergência e convergência, respetivamente.

### 4.3. Determinação da guia associada à berma esquerda do ramo de ligação

Um dos pontos mais críticos do dimensionamento de uma divergência é a definição geométrica da guia associada à berma esquerda do ramo de ligação. Uma vez que, para além de derivar de uma curva de transição caracterizada pela variação do raio e do rumo instantâneos, está associada à variação da sobrelargura em toda a sua extensão até ao final da clotóide.

No entanto, a expressão matemática da clotóide pode ser deduzida analiticamente, ou através de *softwares* informáticos específicos, e a variação da sobrelargura é feita linearmente em toda a extensão da clotóide a partir do ponto em que o ramo de ligação apresenta uma via de circulação com 4 metros de largura.

Na Figura 4.4 e no Quadro 4.20 apresenta-se a dedução da expressão matemática do bordo esquerdo que delimita a via de circulação do ramo e os respetivos dados auxiliares.

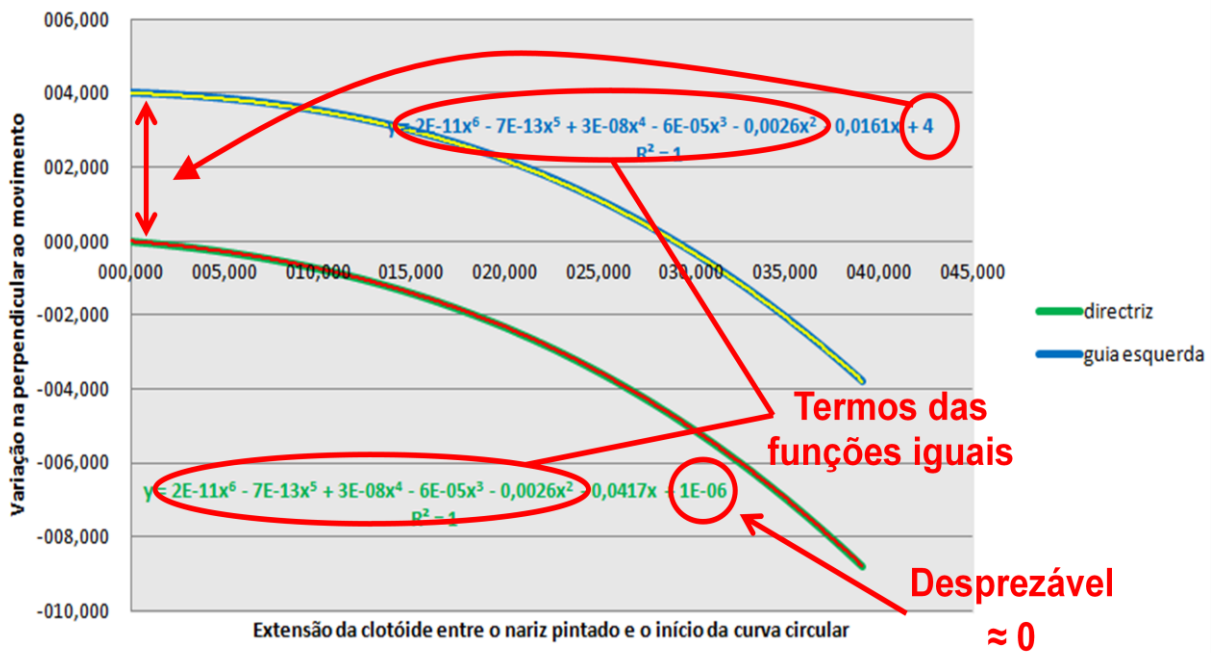


Figura 4.4 – Cálculo da guia esquerda do ramo de ligação

**Quadro 4.20 – Variações planimétricas instantâneas ao longo da clotóide**

<b>Eixo X</b>	<b>Eixo Y</b>	<b>Afastamento em relação ao Eixo X (Berma esquerda)</b>
0,00000	0,00000	4,00000
0,38770	-0,01656	3,99335
1,38770	-0,06306	3,97242
2,38770	-0,11525	3,94579
3,38770	-0,17348	3,91312
4,38770	-0,23807	3,87410
5,38770	-0,30934	3,82839
6,38770	-0,38763	3,77567
7,38770	-0,47326	3,71561
8,38770	-0,56654	3,64789
9,38770	-0,66781	3,57219
10,38770	-0,77739	3,48817
11,38770	-0,89560	3,39553
12,38770	-1,02276	3,29394
13,38770	-1,15918	3,18308
14,34437	-1,29865	3,06807
15,34437	-1,45411	2,93818
16,34437	-1,61976	2,79809
17,34437	-1,79590	2,64751
18,34437	-1,98285	2,48613
19,34437	-2,18090	2,31365
20,34437	-2,39035	2,12976
21,99656	-2,76217	1,80018
22,99656	-3,00327	1,58465
23,99656	-3,25683	1,35665
24,99656	-3,52311	1,11593
25,99656	-3,80240	0,86221
26,99656	-4,09496	0,59522
27,53757	-4,25886	0,44515
28,53757	-4,57236	0,15721
29,17866	-4,78065	-0,03468
30,17866	-5,11710	-0,34557
31,17866	-5,46786	-0,67077
32,17866	-5,83315	-1,01049
32,86676	-6,09305	-1,25280
33,86676	-6,48334	-1,61753
34,11537	-6,58271	-1,71053
35,11537	-6,99187	-2,09413
36,11537	-7,41636	-2,49306
37,11537	-7,85635	-2,90748
38,11537	-8,31200	-3,33757
39,11537	-8,78347	-3,78347

Conforme é possível verificar, o software informático utilizado apenas tem capacidade para determinar uma linha de tendência polinomial de grau 6 em que parte da expressão corresponde à clotóide, e uma pequena parcela à variação da sobrelargura.

A expressão analítica da clotóide (A=55m) é dada por:

$$y = 2E-11x^6 - 7E-13x^5 + 3E-08x^4 - 6E-05x^3 - 0,0026x^2 - 0,0417x \quad (4.4)$$

Por outro lado, a expressão da guia esquerda do ramo de ligação é dada por (SL = 1,0 metro):

$$y = 2E-11x^6 - 7E-13x^5 + 3E-08x^4 - 6E-05x^3 - 0,0026x^2 - 0,0161x + 4 \quad (4.5)$$

Verifica-se que esta última expressão é exatamente igual à expressão da clotóide, variando apenas o termo de grau 1 (0,0161x) e o termo independente (4).

Em suma, podemos concluir que 0,0256x (diferença entre os termos de grau 1 das duas expressões) corresponde ao incremento linear de largura adicional por cada metro percorrido.

A Figura 4.5 mostra a expressão que permite determinar a sobrelargura em cada ponto da clotóide do ramo de ligação para um raio igual a 55 metros (SL = 1,0 metro).

$$SL(X) = \frac{1 \cdot X}{1\text{-km}}$$

Diagrama de anotações em vermelho:

- Uma seta aponta do denominador "1-km" para o texto "SL (R=55m)".
- Uma seta aponta do numerador "1.X" para o texto "Extensão da Clotóide".
- Uma seta aponta do denominador "1-km" para o texto "Km<sub>inicioramo</sub>".

Figura 4.5 – Expressão relativa à sobrelargura instantânea

#### 4.4. Discussão de Resultados

Serve o presente capítulo para analisar os resultados dos dois casos de estudo.

Conforme é possível constatar, ambas as situações possibilitam o correto dimensionamento de um ramo de ligação indireto, com uma curva circular de raio igual a 55 metros, de modo a garantir a extensão mínima de 20 metros da cunha associada à zona de divergência entre a secção corrente da autoestrada e o ramo de saída.

No entanto, o raio mínimo absoluto para a velocidade base de 120 km/h, fruto da sobrelevação associada ao mesmo ( $R=700$  metros  $\rightarrow Se=7\%$ ) constitui um desafio muito maior quer em termos de cálculo planimétrico, mas sobretudo devido à compatibilização altimétrica, uma vez que as secções transversais das plataformas que divergem curvam em sentidos contrários.

Assim, no primeiro caso, devido à dispensa de sobrelevação, a compatibilização é feita sem dificuldades adicionais, pois a faixa de rodagem da autoestrada e do restabelecimento têm uma inclinação transversal igual a 2,5% para o exterior da plataforma. Deste modo, a variação de sobrelevação necessária corresponde a 4,5% para ambas as curvas de transição do ramo.

Já no segundo caso de estudo, embora a compatibilização altimétrica com o restabelecimento assumira uma variação de sobrelevação igual a 4,5, a curva circular de raio igual a 700 metros da diretriz da autoestrada obriga a uma variação de sobrelevação de 14%, sendo que a Norma de Nós de Ligação recomenda para velocidades base entre 40 e 50 km/h, valores compreendidos entre 5 a 6 % para as diferenças algébricas na cunha da divergência. A única solução passou por efetuar duas quebras na cunha, pois com uma só quebra a diferença algébrica rondaria os 8%.

Por outro lado, uma maior extensão da cunha não traria melhorias significativas antes pelo contrário uma vez que esse aumento da extensão é feita através da alteração do parâmetro da clotóide, mantendo fixo o valor do raio da curva circular do ramo de ligação. Ou seja, fixando o valor do raio igual a 55 metros, para aumentar a extensão da curva de transição é necessário aumentar o respetivo parâmetro. Porém, esse aumento da extensão da clotóide implicaria uma diminuição da largura da cunha o que dificultaria toda a compatibilização altimétrica.

Outra dificuldade do segundo caso foi o facto de o raio ser reduzido, originando uma ripagem da curva circular muito acentuada. Esta condicionante implica um mais rápido afastamento do ramo de ligação em relação à secção corrente da autoestrada. No entanto, a variação da sobrelargura do ramo de saída ajuda a atenuar o rápido afastamento das plataformas, uma vez que a sua variação é efetuada ao longo da guia esquerda do ramo.

De acordo com o estudo efetuado, verifica-se que o primeiro caso ( $R=5000$ ) é garantidamente mais vantajoso no que respeita ao benefício da segurança rodoviária, na medida em que os seus parâmetros geométricos não apresentam condicionantes de maior.

Concluiu-se igualmente que uma divergência não deverá ser dimensionada em função do seu comprimento, devendo ser garantida uma largura livre mínima de 6 a 9 metros no nariz da divergência<sup>3</sup>. Garantindo esta medida, os valores dos comprimentos de divergência disparam para cima dos 30 metros (limite máximo referido nas Normas dos Nós de Ligação).

Porém, para garantir a premissa de uma extensão inferior a 30 metros, se houver guardas de segurança, o ângulo de fileira das mesmas seria diminuto e o

---

<sup>3</sup> O nariz físico corresponde ao ponto em que as plataformas do ramo de ligação e da plena via se separam definitivamente.

terminal especial duplo da guarda não poderia deformar-se corretamente para reter a dissipação de energia proveniente de uma potencial colisão.

Ao ter como objetivo garantir uma divergência bem compatibilizada devem ter-se em consideração os seguintes aspetos: largura livre da cunha e do nariz físico; diferenças algébricas máximas permitidas na Norma dos Nós de Ligação (JAE, 1993) – que usualmente não devem exceder os 6% para ramos de saída indiretos; adoção de vias de desaceleração do tipo paralelo e correta definição do bordo esquerdo da via de circulação do ramo (ver subcapítulo 4.3), com auxílio da expressão que determina a variação linear de sobrelargura.

## 5. Considerações Finais

A realização deste trabalho final de mestrado revelou-se bastante pertinente no que respeita ao surgimento de possíveis recomendações normativas.

Neste sentido, verifica-se em primeiro lugar, que o dimensionamento das vias auxiliares de mudança de velocidade, nos casos de vias que curvam em sentidos contrários, deverá respeitar as recomendações da norma americana (AASHTO, 2001). Esta questão é justificada pelo facto da norma portuguesa de interseções (JAE, 1990) afirmar que à exceção das autoestradas, todas as vias de desaceleração devem respeitar as recomendações nela inscritas. Por outro lado, a norma de nós de ligação (JAE, 1993) recomenda a saída do tipo direto.

Adicionalmente, para as condições de aplicabilidade dos dois caso de estudo, a norma de nós de ligação (JAE, 1993) deverá recomendar os ramos de saída do tipo paralelo. Assim, a segurança rodoviária ficará beneficiada, pois nestes casos, a redução de velocidade processa-se numa via adicional de redução de velocidade minimizando, assim, o risco de colisões traseiras, ao invés de se materializar na via de circulação da autoestrada.

Não obstante, a extensão mínima das cunhas associadas às divergências deverá deixar de ser um fator que influencie o dimensionamento da divergência, como atualmente se verifica. Deste modo, seria possível corrigir divergências mal dimensionadas que prejudicam a segurança rodoviária e requerem a adoção de dispositivos de retenção de veículos, pois não garantem a largura mínima do nariz, que após o primeiro embate, e por falta de uma manutenção dispendiosa, apenas minimizam/retardam o problema de dimensionamento detetado.

Ainda neste âmbito, o ponto correspondente ao início da separação física das plataformas da plena via do ramo de ligação deverá ser reconsiderado, uma vez que, caso este corresponda à interseção do limite esquerdo da plataforma do ramo, e respetivo limite direito da plataforma do autoestrada, permite ter uma

largura no nariz aproximada de 4 metros, não possibilitando a colocação de alinhamentos duplos de fecho (guardas de segurança) com  $R = 2$  metros. Esta situação verifica-se na maioria das divergências das infraestruturas rodoviárias nacionais, considerando-se, por isso, essencial que o nariz apresente uma largura compreendida entre 6 e 9 metros, conforme recomendado nas normas americanas (AASHTO, 2001).

Por último, considera-se ainda que deverá ser apresentado nas normas portuguesas de nós de ligação (JAE, 1993) a metodologia de cálculo subjacente ao nó de ligação, incluindo a pormenorização das zonas de divergência e convergência e ainda a explanação de como deduzir as cotas da secção corrente do autoestrada, direcionando essa responsabilidade para o projetista e não para entidades terceiras.

## Referências Bibliográficas

**AASHTO. 2001.** *A policy on geometric design of highways and streets.* 4ª. Washington : American Association of State Highway and Transportation Officials, 2001. p. 905. 1-56051-156-7.

**Fragata, João Pedro. 2008.** *Projeto de execução de um nó de ligação em trompette nas especialidades de geometria do traçado e pavimentação .* Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Porto. Porto : Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2008. p. 244, Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil - Especialização em Vias de Comunicação .

**Google Earth.** Google Earth. *Google Earth.* [Online] Google. [Citação: 12 de Dezembro de 2013.] earth.google.com.

**Inir. 2011.** Revisão da norma de traçado. *Inir - Instituto de Infraestruturas Rodoviárias IP.* [Online] 19 de Janeiro de 2011. [Citação: 23 de Novembro de 2012.]

<http://www.inir.pt/portal/LinkClick.aspx?fileticket=I%2BmqF3AOYtM%3D&tabid=111&mid=482&language=pt-PT>.

**JAE. 1990.** *Norma de Interseções.* [ed.] Divisão de Estudos e Projetos da Junta Autónoma de Estradas. Lisboa : Edição JAE, 1990. p. 67.

—. **1993.** *Norma de Nós de Ligação.* [ed.] JAE Divisão de Estudos e Projectos da Junta Autónoma das Estradas. Lisboa : Edição JAE, 1993. 122127/98.

—. **1994.** *Norma de traçado JAE P3/94.* [ed.] Divisão de Estudos e Projectos da Junta Autónoma das Estradas. Lisboa : Edição JAE, 1994. 122127/98.

**LNEC. 1962.** *Vocabulário de Estradas e Aeródromos.* 4ª. Lisboa : Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1962. p. 362. Vol. ix. 0870-8592.

**Teles Fortes, L. 2009.** *Infra-estruturas rodoviárias – Zonas de divergência associadas aos ramos de saída dos nós de ligação.* ISEL. Lisboa, Portugal : s.n., 2009. Concurso de provas públicas para provimento de um lugar de professor adjunto.



## **Anexos**

### **Anexo A – Correta apresentação de peças desenhadas**

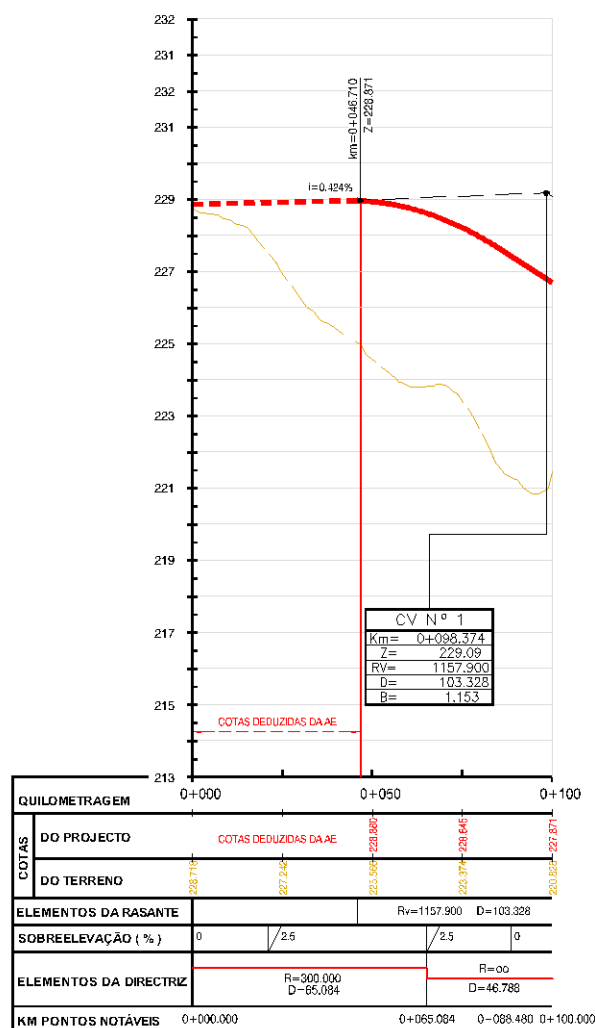
Para a correta execução de um projeto é vital que a sua apresentação seja clara, de modo a não possibilitar interpretações dúbias. Sobre esta questão, Teles Fortes (2009) refere que, de acordo com a sua experiência profissional, os projetos de nós de ligação habitualmente não apresentam um nível de pormenor adequado tanto na realização dos cálculos dos ramos como na apresentação das peças desenhadas.

Neste sentido, revela-se pertinente para o âmbito do trabalho realizado aprofundar algumas questões pertinentes relativamente à correta apresentação das peças desenhadas relativas ao perfil longitudinal, às plantas de pormenor e aos perfis transversais característicos da autoestrada nas zonas de compatibilização com os ramos de ligação.

#### **1. Perfil longitudinal**

Os perfis longitudinais relativos aos ramos de saída apresentam sistematicamente, na sua zona inicial, a frase “*cotas deduzidas a partir da autoestrada*” ou uma outra semelhante a esta. Na verdade, somente após o ponto em que o ramo se torna fisicamente independente da autoestrada é que surge o cálculo altimétrico do ramo, ou seja as cotas no pente do respetivo perfil longitudinal do ramo (Teles Fortes, 2009).

Ilustra-se esta situação na Figura A.1.



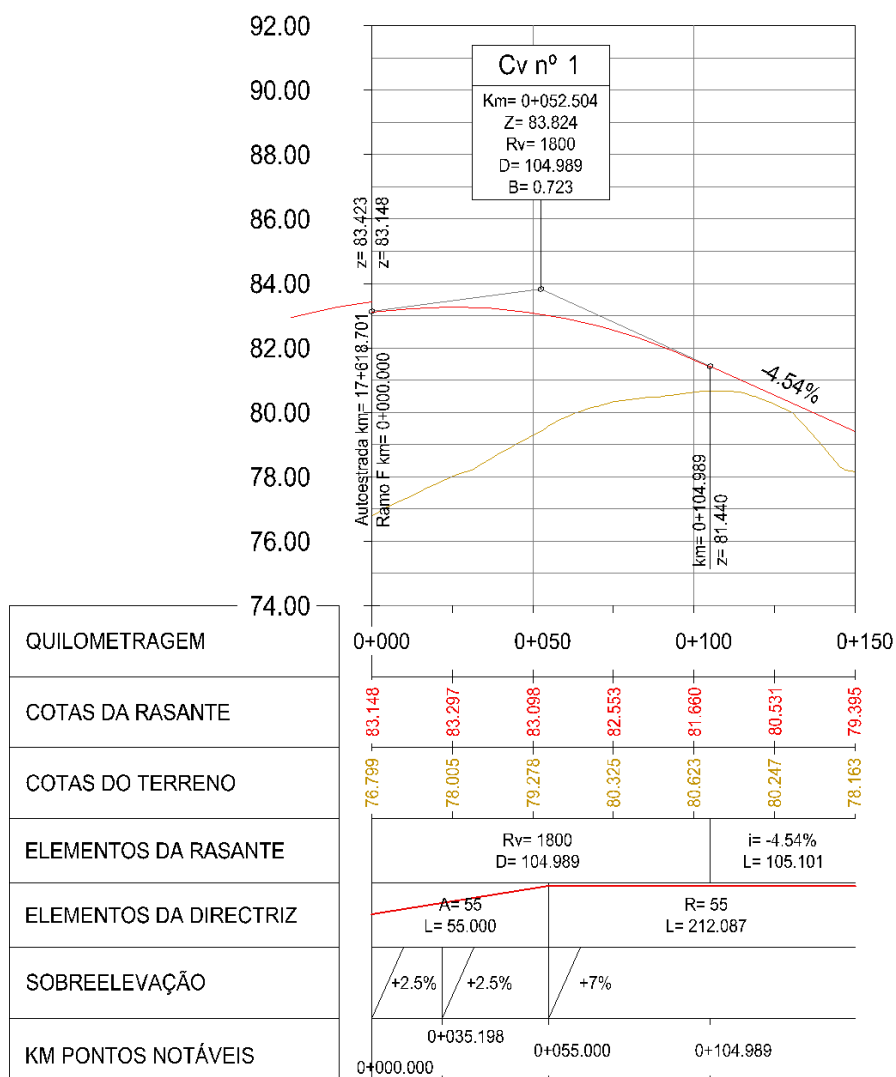
**Figura A.1 – Exemplo de informação incompleta no início de um Ramo de Saída**

Fonte: Teles Fortes (2009)

De acordo com Teles Fortes (2009) “a fase de projeto de execução deve ser clara e objetiva não sendo de aceitar este tipo de informação que, muitas vezes, é incompatível com as características apresentadas pelo conjunto perfil longitudinal/perfil transversal do ramo de saída tendo em conta as características da autoestrada na mesma zona, pelo que a simples dedução de cotas a partir da

secção corrente não resolveria o problema mas originaria, isso sim, um problema”.

Seguidamente, na Figura A.2 ilustra-se a parte inicial de um perfil longitudinal associado a um ramo de saída devidamente dimensionado e reportado para a respectiva peça desenhada.



**Figura A.2 – Exemplo de informação completa no início de um Ramo de Saída**

Fonte: Teles Fortes (2009)

De acordo com a Figura A.2, o perfil longitudinal do ramo de ligação encontra-se devidamente dimensionado na sua zona inicial, contemplando no respetivo pente as cotas e os parâmetros geométricos associados à sua rasante.

De modo, a demonstrar-se a compatibilidade altimétrica com a plena via, apresentam-se, fora do perfil longitudinal do ramo, os 25 metros de rasante da secção corrente da autoestrada que antecede a secção transversal associada ao início do cálculo do ramo de ligação.

O desnível verificado entre a cota inicial do ramo de ligação e a cota da rasante da autoestrada na respetiva secção transversal deve-se à inclinação transversal, associada ou não a sobrelevação, e à distância entre os dois pontos.

## **2. Perfis transversais característicos da autoestrada**

Conforme referido no ponto anterior, a falta de informação no perfil longitudinal/perfil transversal pode originar incompatibilidades na construção da zona de divergência, uma vez que a dedução de cotas a partir da secção corrente da autoestrada poderá originar um problema de compatibilização dos dois traçados.

Na Figura A.3 é possível observar a informação que um perfil transversal da secção corrente de uma autoestrada deverá conter para não deixar margem para dúvidas na fase de construção da zona de divergência, nomeadamente: a indicação das inclinações transversais das vias de circulação da plena via, da cunha e do ramo de ligação, assim como as cotas nos respetivos pontos onde existe uma quebra da inclinação transversal da secção e, ainda, os pontos quilométricos correspondentes à autoestrada e ao ramo de ligação.



Na Figura A.4 representa-se uma zona de divergência devidamente caracterizada, com as distâncias, inclinações transversais, cotas e coordenadas planimétricas dos pontos relativos ao início do ramo de ligação, ao início da divergência e ao início da separação física dos ramos.

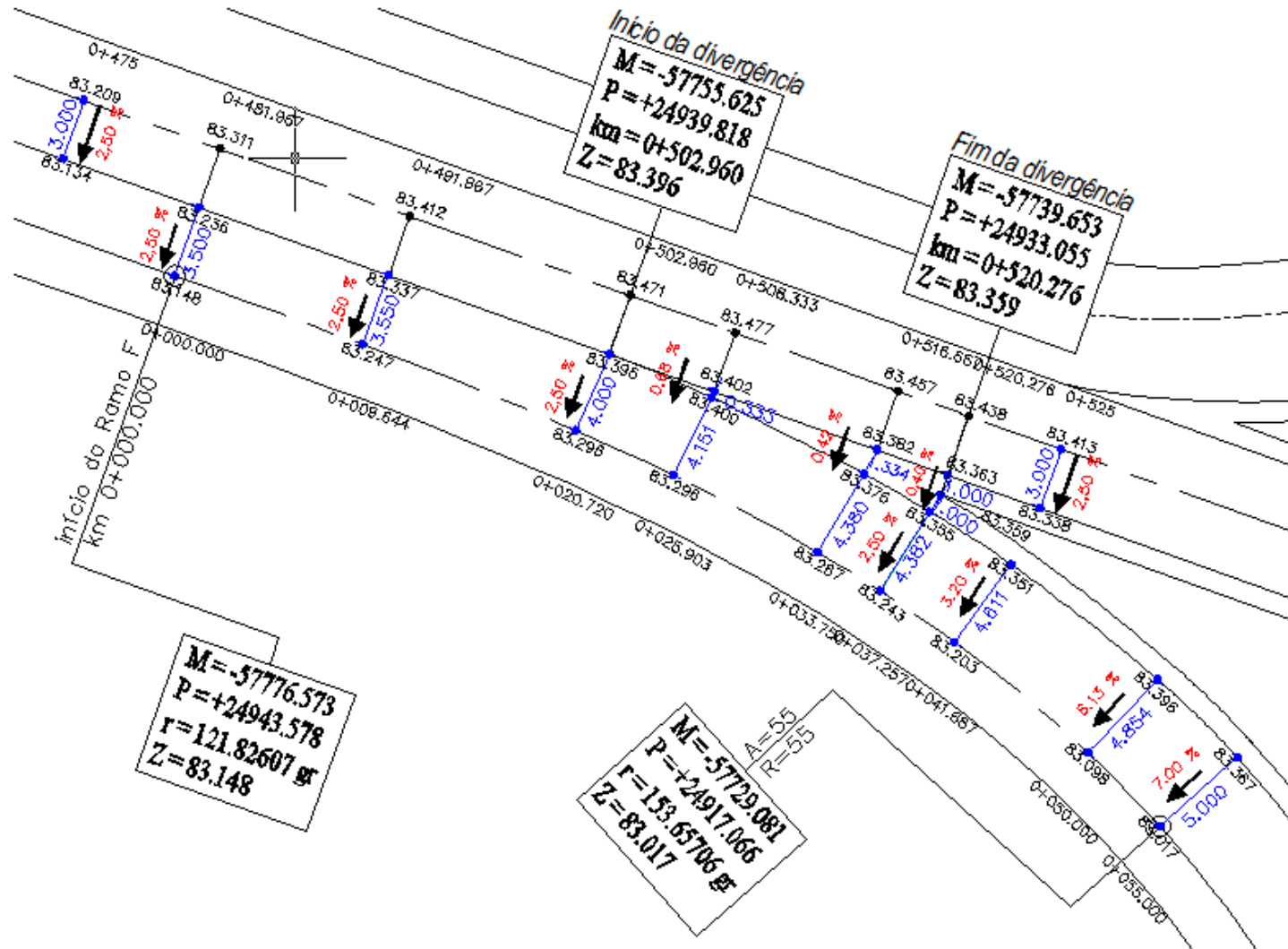
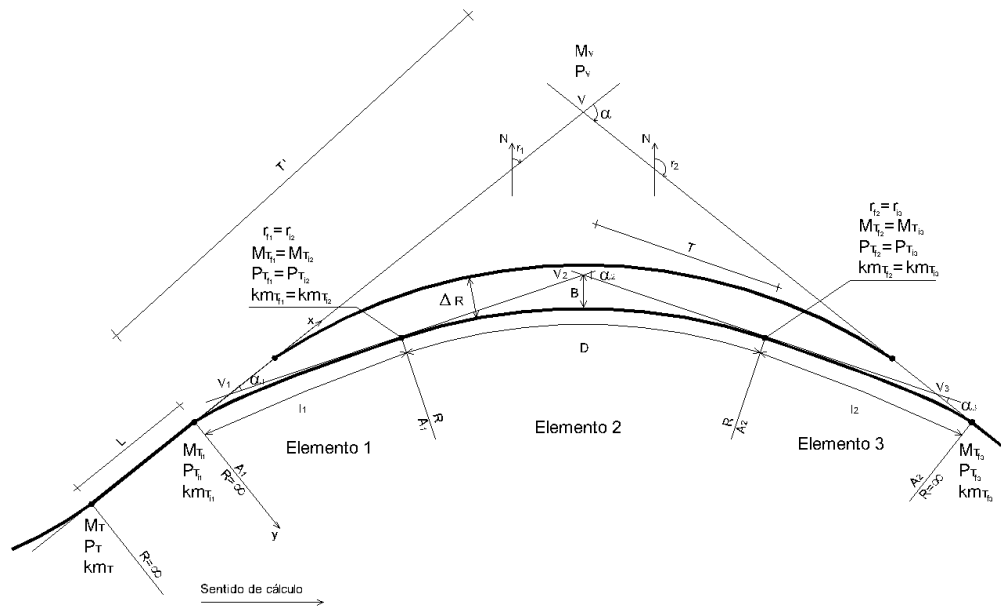


Figura A.4 – Informação completa relativa a uma divergência entre uma estrada nacional e um ramo de ligação



**Anexo B – Esquema de cálculo para a determinação das coordenadas do ramo**

O esquema de cálculo para a determinação das coordenadas do ramo ilustra-se na Figura B.1.



**Figura B.5 – Esquema de cálculo da curva circular com transições em clóides iguais**

Seguidamente apresentam-se as equações utilizadas para o cálculo.

(B.1)

$$\begin{cases} P_V = \frac{M_1 - M_2 + P_2 \times tg(r_2) - P_1 \times tg(r_1)}{tg(r_2) - tg(r_1)} \\ M_V = M_1 + (P_V - P_1) \times tg(r_1) \end{cases}$$

Em que:

$M_V$  e  $P_V$  – são as coordenadas do vértice da curva circular;

$M_1$ ,  $P_1$  e  $r_1$  – são as coordenadas e rumo do ponto inicial do ramo;

$M_2$ ,  $P_2$  e  $r_2$  – são as coordenadas e rumo do ponto final do ramo.

(B.2)

$$L = \sqrt{(M_V - M_T)^2 + (P_V - P_T^2)} - T'$$

Em que:

$L$  – é a extensão entre o ponto do alinhamento reto e o primeiro ponto de tangencia;

$M_T$  e  $P_T$  – são as coordenadas do ponto do alinhamento reto;

$T$  – tangente.

(B.3)

$$\alpha = \frac{|R|}{R} \times (200 - |200 - |r_2 - r_1||)$$

Em que:

$\alpha$  – ângulo de desvio entre os dois alinhamentos retos.

(B.4)

$$\phi = \frac{A^2}{2 \times R^2}$$

Em que:

$\phi$  – ângulo entre o alinhamento reto e a tangente ao ponto final da primeira clotoide, em radianos.

(B.5)

$$\alpha_1 = \alpha_3 = \phi \times \frac{200}{\pi} \times \frac{|R|}{R}$$

Em que:

$\alpha_1$  – ângulo entre o alinhamento reto e a tangente ao ponto final da primeira clotóide da curva, em graus;

$\alpha_3$  – ângulo entre o alinhamento reto e a tangente ao ponto final da segunda clotóide da curva, em grau.

(B.6)

$$X = A \times \sqrt{2 \times \phi} \times \left( 1 - \frac{\phi^2}{10} + \frac{\phi^4}{216} - \frac{\phi^6}{1350} \right)$$

Em que:

$X$  – distância segundo o alinhamento reto que passa no vértice entre o ponto de início e fim da clotóide.

(B.7)

$$Y = A \times \sqrt{2 \times \phi} \times \left( \frac{\phi}{3} - \frac{\phi^3}{42} + \frac{\phi^5}{1320} - \frac{\phi^7}{75600} \right)$$

Em que:

$Y$  – distância perpendicular ao alinhamento reto que passa no vértice entre o ponto de início e fim da clotóide.

(B.8)

$$\Delta R = Y - |R| \times (1 - \cos(\alpha_1))$$

Em que:

$\Delta R$  – ripagem da curva circular, devido à existência de clotóides.

(B.9)

$$T' = \sqrt{(M_V - M_{Tf1})^2 + (P_V - P_{Tf1})^2}$$

Em que:

$T'$  – distância medida no alinhamento reto que passa no vértice entre o ponto final da clotóide e o vértice;

$M_{Tf1}$  e  $P_{Tf1}$  – coordenadas do ponto final da primeira clotóide.

(B.10)

$$\alpha_2 = \alpha - 2 \times \alpha_1$$

$$T = R \times \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha_2}{2}\right)$$

$$B = \sqrt{T^2 + R^2} - |R|$$

Em que:

$B$  – bissetriz.

(B.11)

$$D = \alpha_2 \times \frac{\pi}{200} \times R$$

Em que:

$D$  – desenvolvimento da curva circular.

(B.12)

$$\begin{cases} M_{Ti} = M_V - T' \times \sin(r_1) \\ P_{Ti} = P_V - T' \times \cos(r_1) \end{cases}$$

Em que:

$M_{Ti}$  e  $P_{Ti}$  – coordenadas do ponto inicial da primeira clotóide.

(B.13)

$$\begin{cases} M_{T_{f1}} = M_{T_{i2}} = M_{T_{i1}} = +X \times \sin(r_1) + \frac{|R|}{R} \times Y \times \sin(r_1 + 100) \\ P_{T_{f1}} = P_{T_{i2}} = P_{T_{i1}} = +X \times \cos(r_1) + \frac{|R|}{R} \times Y \times \cos(r_1 + 100) \end{cases}$$

Em que:

$M_{Tf1}$  e  $P_{Tf1}$  – coordenadas do ponto final da primeira clotóide;

$M_{Ti2}$  e  $P_{Ti2}$  – coordenadas do ponto inicial da curva circular, que é coincidente com o ponto final da primeira clotóide.

(B.14)

$$r'_{f1} = r'_{i2} = r_1 + \alpha_1$$

$$r'_{f1} = r'_{i2} \Rightarrow r'_{f1} < 0 \rightarrow r_{f1} = r'_{f1} + 400 \vee r'_{f1} > 400 \rightarrow r_{f1} = r'_{f1} - 400$$

Em que:

$r'_{f1}$  – rumo do alinhamento reto tangente no final da primeira clotóide;

$r_{f1}$  – rumo do alinhamento reto tangente no final da primeira clotóide, com o ângulo entra 0 e 400 grados;

$r'_{i2}$  – rumo no início da curva circular.

(B.15)

$$\begin{cases} M_c = M_{Tf1} + R \times \sin(r_{f1} + 100) \\ P_c = P_{Tf1} + R \times \cos(r_{f1} + 100) \end{cases}$$

Em que:

$M_c$  e  $P_c$  – coordenadas do centro da curva circular.

(B.16)

$$\begin{cases} M_{Ti3} = M_v + T' \times \sin(r_2) \\ P_{Ti3} = P_v + T' \times \cos(r_2) \end{cases}$$

Em que:

$M_{Ti3}$  e  $P_{Ti3}$  – coordenadas iniciais da segunda clotóide;

(B.17)

$$\begin{cases} M_{Tf2} = M_{Ti3} = M_{Tf3} - X \times \sin(r_2) + \frac{|R|}{R} \times Y \times \sin(r_2 + 100) \\ P_{Tf2} = P_{Ti3} = P_{Tf3} - X \times \cos(r_2) + \frac{|R|}{R} \times Y \times \cos(r_2 + 100) \end{cases}$$

Em que:

$M_{Tf2}$  e  $P_{Tf2}$  – coordenadas do ponto final da curva circular;

$M_{Ti3}$  e  $P_{Ti3}$  – coordenadas iniciais da segunda clotóide, que são coincidentes com o ponto final da curva circular.

(B.18)

$$\begin{aligned} r'_{f2} = r'_{i3} = r_2 - \alpha_1 \\ r'_{f2} = r'_{i3} \Rightarrow r'_{f2} < 0 \rightarrow r_{f2} = r'_{f2} + 400 \vee r'_{f2} > 400 \rightarrow r_{f2} = r'_{f2} - 400 \end{aligned}$$

Em que:

$r'_{f2}$  – rumo do alinhamento reto tangente no final da curva circular;

$r_{f2}$  – rumo do alinhamento reto tangente no final da curva circular, com o ângulo entra 0 e 400 grados;

$r'_{i3}$  – rumo no início da segunda clotóide.

(B.19)

$$Km_{Ti1} = Km_T + L$$

Em que:

**$Km_{Ti1}$**  – ponto quilométrico do ponto  **$T_{i1}$** ;

**$Km_T$**  – ponto quilométrico do ponto  **$T$** .

(B.20)

$$Km_{Tf1} = Km_{Ti1} + L, \text{ onde } L = \frac{A_1^2}{|R|}$$

Em que:

**$Km_{Tf1}$**  – ponto quilométrico do ponto  **$T_{f1}$** ;

**$A_1$**  – parâmetro da clotóide de entrada.

(B.21)

$$Km_{Tf2} = Km_{Ti3} + D$$

Em que:

**$Km_{Tf2}$**  – ponto quilométrico do ponto  **$T_{f2}$** ;

**$Km_{Ti3}$**  – ponto quilométrico do ponto  **$T_{i3}$** .

(B.22)

$$Km_{Tf3} = Km_{Ti3} + L, \text{ onde } L = \frac{A_2^2}{|R|}$$

Em que:

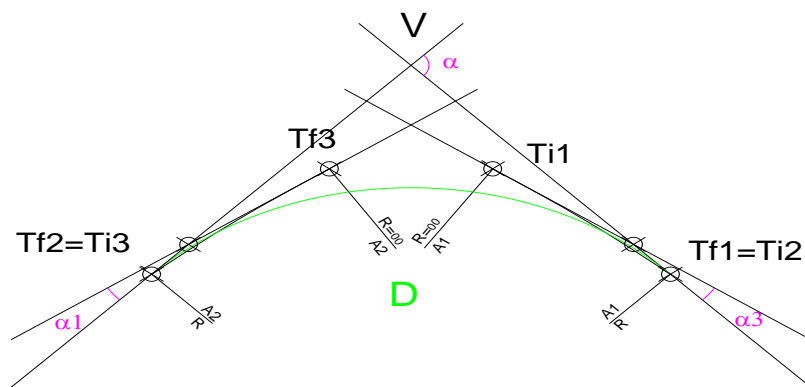
**$Km_{Tf3}$**  – ponto quilométrico do ponto  **$T_{f3}$** ;

**$A_2$**  – parâmetro da clotóide de saída.



## Anexo C - Método de cálculo da curva circular

Na Figura C.1 esquematiza-se o método de cálculo da curva circular:



**Figura C.6 – Esquema do método de cálculo Curva Circular**

O cálculo das coordenadas dos pontos equidistantes de 8,333 metros na curva circular, foi obtido através das equações:

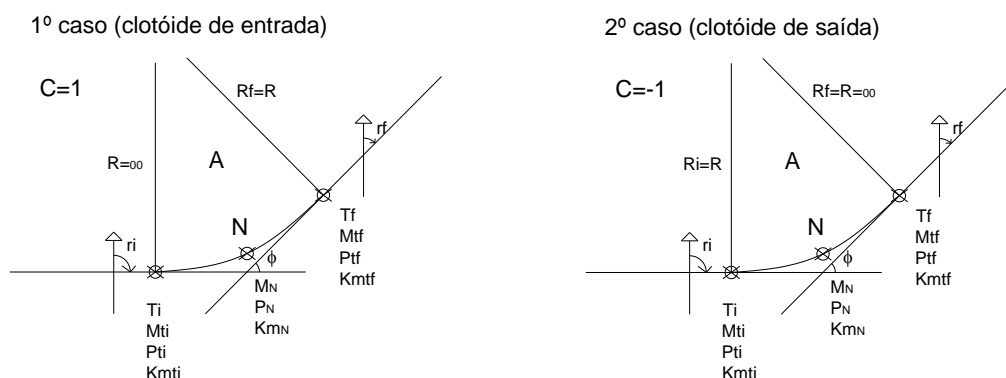
(C.1)

$$M_x = M_C + R \times \text{sen}(r_x - 100)$$

$$P_x = P_C + R \times \text{cos}(r_x - 100)$$

$$r_x = r_1 + \alpha_x$$

No entanto, nas curvas de transição o cálculo das coordenadas é processado de maneira diferente, conforme se ilustra na Figura C.2.



**Figura C.7 – Esquema do método de cálculo Clotóides**

O cálculo das coordenadas dos pontos equidistantes de 8,333 metros nas clotóides, foi obtido através das equações:

(C.2)

$$\phi_N = \frac{(Km_N - Km)^2}{2 \times A^2}$$

Em que:

$\phi_N$  – ângulo entre os rumos de início e de fim da clotóide, em radianos;

$Km_N$  – ponto quilométrico do ponto a determinar na clotóide;

$Km_N$  – ponto quilométrico do início da clotóide;

$A$  – parâmetro da clotóide.

(C.3)

$$X_N = A \times \sqrt{2 \times \phi} \times \left( 1 - \frac{\phi^2}{10} + \frac{\phi^4}{216} - \frac{\phi^6}{1350} \right)$$

Em que:

$X_N$  – distância entre o ponto de início da clotóide e o ponto a ser determinado na clotóide, segundo a tangente ao ponto inicial da mesma.

(C.4)

$$Y_N = A \times \sqrt{2 \times \phi} \times \left( \frac{\phi}{3} - \frac{\phi^3}{42} + \frac{\phi^5}{1320} - \frac{\phi^7}{75600} \right)$$

Em que:

$Y_N$  – distância entre o ponto de início da clotóide e o ponto a ser determinado na clotóide, segundo a perpendicular à tangente no ponto inicial da mesma.

(C.5)

$$\begin{cases} M_N = M + C \times X \times \sin(r) + \frac{|R|}{R} \times Y \times \sin(r + 100) \\ P_N = P + C \times X \times \cos(r) + \frac{|R|}{R} \times Y \times \cos(r + 100) \end{cases}$$

Em que:

$M_N$  e  $P_N$  – coordenadas do ponto a ser determinado na clotóide;

$M$  e  $P$  – coordenadas do ponto inicial ou final da clotóide, consoante o cálculo seja relativo à clotóide de entrada ou de saída;

$C$  – coeficiente da clotóide, cujo valor é igual a 1 na clotóide de entrada e igual a -1 na curva de transição de saída;

$r$  – rumo inicial ou final da clotóide, consoante o cálculo a realizar;

$R$  – raio da curva circular.

(C.6)

$$\phi' = \phi \times \frac{200}{\pi}$$

Em que:

$F'$  – ângulo entre os rumos de início e de fim da clotóide, em graus;

$F$  – ângulo entre os rumos de início e de fim da clotóide, em radianos.

(C.7)

$$r'_N = r + C \times \frac{|R|}{R} \times \varphi'$$

$$r_N = r'_N \Rightarrow r'_N < 0 \rightarrow r_N = r'_N + 400 \vee r'_N > 400 \rightarrow r_n = r'_N - 400$$

Em que:

$r'_N$  – rumo no ponto **N**;

$r_N$  – rumo no ponto **N**, entre 0 e 400.

## Anexo D – Cálculo da rasante do ramo de ligação

O cálculo da rasante do ramo de ligação foi efetuado de acordo com os esquemas ilustrados nas Figuras D.1 e D.2.

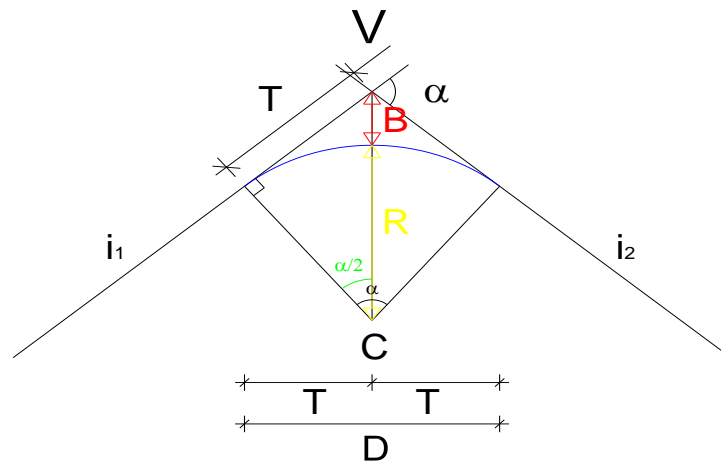


Figura D.8 – Esquema de cálculo da concordância vertical

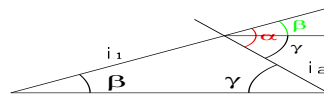


Figura D.9 – Esquema de cálculo da tangente

Assim como, através das equações que se apresentam seguidamente.

(D.1)

$$tg(\alpha) = n = i_1 - i_2$$

Em que:

a – ângulo de desvio;

$i_1$  – inclinação do primeiro tranel;

$i_2$  – inclinação do segundo tranel.

(D.2)

$$T = R \times \frac{\text{tg}(\alpha)}{2}$$

Em que:

T – tangente;

R – raio.

(D.3)

$$D = 2 \times T$$

Em que:

D – desenvolvimento.

(D.4)

$$X = \frac{Z_2 - Z_1 + (Km_1 - Km_2) \times i_2}{i_1 - i_2}$$

Em que:

X – distância do ponto 1 (associado ao 1º tranel) ao vértice;

km<sub>1</sub> – ponto quilométrico do ponto 1;

km<sub>2</sub> – ponto quilométrico do ponto 2 (associado ao 2º tranel);

Z<sub>1</sub> – cota do primeiro ponto;

Z<sub>2</sub> – cota do segundo ponto.

(D.5)

$$Z_v = Z_1 + X \times i_1$$

Em que:

Z<sub>v</sub> – cota do vértice.

(D.6)

$$Km_v = Km_1 + X$$

Em que:

$km_v$  – ponto quilométrico do vértice.

(D.7)

$$Z_{T1} = Z_v - T \times i_1$$

Em que:

$Z_{T1}$  – cota do ponto de tangencia do primeiro trainel.

(D.8)

$$Z_{T2} = Z_v + T \times i_2$$

Em que:

$Z_{T2}$  – cota do ponto de tangencia do segundo trainel.

(D.9)

$$Km_{T1} = Km_v - T$$

Em que:

$Km_{T1}$  – ponto quilométrico do primeiro ponto de tangencia da concordância.

(D.10)

$$Km_{T2} = Km_{T1} + D$$

ou

$$Km_{T1} = Km_v - T$$

Em que:

$Km_{T2}$  – ponto quilométrico do segundo ponto de tangencia da concordância.

(D.11)

$$Z_{\substack{\text{Alto} \\ \text{Baixo}}} = Z_{T1} + i_1^2 \times R - \frac{(i_1 \times R)^2}{2 \times R}$$

$$X = i_1 \times R$$

Em que:

$Z_{\text{Alto}}$  – cota do ponto alto;

$Z_{\text{Baixo}}$  – cota do ponto baixo;

$X$  – distância do primeiro ponto de tangencia ao ponto alto ou baixo.

(D.12)

$$Km_{\text{Alto}} = Km_{T1} + X$$

Baixo

Em que:

$km_{\text{Alto}}$  – ponto quilométrico do ponto alto;

$km_{\text{Baixo}}$  – ponto quilométrico do ponto baixo.

(D.13)

$$\frac{dZ_x}{dX} = i_1 - \frac{X}{R}$$

Em que:

$\frac{dZ_x}{dX}$  – inclinação instantânea dum ponto X na concordância.

Traineis:

(D.14)

$$D = Km_f - Km_i$$

Em que:

$Km_f$  – ponto quilométrico do fim do trainel;

$Km_i$  – ponto quilométrico do início do trainel.

**Anexo E – Parâmetros da diretriz da autoestrada (R=5000 metros)**

Elemento n°	km	Raio		Coordenadas		Rumo (gr)	Rumo (rad)
				(M)	(P)		
Curva 1 <sub>(esquerda)</sub>	17525,679	-5000,000	I	-57868,940	24858,378	33,66251	0,52877
	456,155		F	-57657,096	25262,179		
			C	-62186,083	27380,734		
	17550,000			-57856,722	24879,407	33,35284	0,52391
	17575,000			-57844,270	24901,085	33,03453	0,51891
	17600,000			-57831,926	24922,825	32,71622	0,51391
	17625,000			-57819,691	24944,626	32,39791	0,50891
	17650,000			-57807,565	24966,489	32,07960	0,50391
	17675,000			-57795,549	24988,411	31,76129	0,49891
	17700,000			-57783,642	25010,394	31,44298	0,49391
	17725,000			-57771,845	25032,436	31,12467	0,48891
	17750,000			-57760,159	25054,536	30,80636	0,48391
	17775,000			-57748,583	25076,695	30,48805	0,47891
	17800,000			-57737,119	25098,911	30,16974	0,47391
	17825,000			-57725,765	25121,184	29,85143	0,46891
	17850,000			-57714,523	25143,514	29,53312	0,46391
	17875,000			-57703,393	25165,900	29,21481	0,45891
	17900,000			-57692,375	25188,341	28,89650	0,45391
	17925,000			-57681,469	25210,837	28,57819	0,44891
	17950,000			-57670,676	25233,387	28,25988	0,44391
	17975,000			-57659,996	25255,990	27,94157	0,43891
	17981,834			-57657,096	25262,179	27,85456	0,43754



**Anexo F – Parâmetros da rasante da autoestrada, na zona do ramo de saída**

	<b>Cota</b>	<b>Extensão</b>	<b>Inclinação</b>	<b>Bissetriz</b>	<b>Raio</b>
<b>km</b>	<b>(m)</b>	<b>(m)</b>	<b>(m/m)</b>	<b>(m)</b>	<b>(m)</b>
17542,589	75,089	416,122	0,01115	0,866	25000,000
17959	76,266		-0,00549		
17550	75,171		0,01085		
17575	75,429		0,00985		
17600	75,663		0,00885		
17625	75,872		0,00785		
17650	76,056		0,00685		
17675	76,215		0,00585		
17694	76,319		0,00509		
17700	76,349		0,00485		
17702	76,360		0,00476		
17714	76,415		0,00428		
17711	76,398		0,00442		
17719	76,434		0,00409		
17725	76,457		0,00385		
17727	76,467		0,00376		
17736	76,496		0,00342		
17740	76,509		0,00327		
17750	76,541		0,00285		
17775	76,600		0,00185		
17800	76,634		0,00085		
17825	76,643		-0,00015		
17850	76,627		-0,00115		
17875	76,585		-0,00215		
17900	76,519		-0,00315		
17925	76,428		-0,00415		
17950	76,312		-0,00515		
17959	76,266		-0,00549		



## Anexo G – Parâmetros de traçado do restabelecimento

Elementos da diretriz:

Elemento n°	km		Clotóide (A)	Coordenadas		Rumo (gr)
	Desenvolvimento	Raio		(M)	(P)	
Tangente 1	211,854			-58028,781	25040,503	121,826
	657,384			-57609,180	24890,731	
	445,530					

Elementos da rasante:

Elemento n°	km	Cota	Extensão (m)	Inclinação (m/m)	Bissectriz (m)	Raio (m)
		(m)				
Trainel 1	273,652 407,747	74,272 80,977	134,095	0,050		
Curva 2 <sub>(convexa)</sub>	407,747 520,657	80,977 83,435				
Curva 3 <sub>(côncava)</sub>	520,657 622,985	83,435 86,047	102,328	-0,006 0,058	-0,818	2000,000 -1600,000



**Anexo H – Parâmetros e fórmulas das curvas de transição do ramo de ligação, associado a R=5000 metros**

<b>Fórmulas da clotoide de entrada</b>	<b>Resultados</b>	<b>Variáveis</b>	<b>Resultados</b>
$\phi = A^2/(2 \cdot R^2)$	0,50000	r1	31,518482
$\alpha = \phi \cdot (200/\pi) \cdot (\sqrt{R^2/R})$	31,83099	M1	-57770,837
$x = A \cdot \sqrt{(2 \cdot \phi) \cdot ((1 - (\phi^2/10)) + (\phi^4/216)) - (\phi^6/9350)}$	53,641	P1	24996,741
$y = A \cdot \sqrt{(2 \cdot \phi) \cdot ((\phi/3) - (\phi^3/42)) + (\phi^5/1320) - (\phi^7/75600)}$	9,002	R	55
$Mt_f = M1 + c \cdot x \cdot \text{sen}(r1) + \text{abs}(R)/R \cdot y \cdot \text{sen}(r1 + 100)$	-57737,431	A	55
$Pt_f = P1 + c \cdot x \cdot \text{cos}(r1) + \text{abs}(R)/R \cdot y \cdot \text{cos}(r1 + 100)$	25039,665	$\alpha 1$	31,83099
$Mc = MT_f + R \cdot \text{sen} ( rf + 100)$	-57707,488	rf1	63,34947
$Pc = PT_f + R \cdot \text{cos} ( rf + 100)$	24993,530	c	1
$r' = r1 + c \cdot \text{abs}R/R \cdot a$	63,349470		
$rf = r'$ se $0 < r' < 400$ ou $rf = r' + 400$ se $r' < 0$ ou $rf = r' - 400$ se $r' > 400$	63,349470		
$l1 = l2 = A^2/\text{abs}(R)$	55		
<b>Fórmulas da clotoide de saída</b>	<b>Resultados</b>	<b>Variáveis</b>	<b>Resultados</b>
$\phi = A^2/(2 \cdot R^2)$	0,50000	r1	121,826070
$\alpha = \phi \cdot (200/\pi) \cdot (\sqrt{R^2/R})$	31,83099	M1	-57752,425
$x = A \cdot \sqrt{(2 \cdot \phi) \cdot ((1 - (\phi^2/10)) + (\phi^4/216)) - (\phi^6/9350)}$	53,641	P1	24948,762
$y = A \cdot \sqrt{(2 \cdot \phi) \cdot ((\phi/3) - (\phi^3/42)) + (\phi^5/1320) - (\phi^7/75600)}$	9,002	R	55
$Mt_f = M1 + c \cdot x \cdot \text{sen}(r1) + \text{abs}(R)/R \cdot y \cdot \text{sen}(r1 + 100)$	-57698,880	A	55
$Pt_f = P1 + c \cdot x \cdot \text{cos}(r1) + \text{abs}(R)/R \cdot y \cdot \text{cos}(r1 + 100)$	24939,208	c	1
$Mc = MT_f + R \cdot \text{sen} ( rf - 100)$	-57707,488		
$Pc = PT_f + R \cdot \text{cos} ( rf - 100)$	24993,530		
$r' = r1 + c \cdot \text{abs}R/R \cdot a$	89,995081		
$rf = r'$ se $0 < r' < 400$ ou $rf = r' + 400$ se $r' < 0$ ou $rf = r' - 400$ se $r' > 400$	89,995081		
$l1 = l2 = A^2/\text{abs}(R)$	55		

<b>Erro</b>	
M =	0,00001000085
P =	0,00000999956



**Anexo I – Parâmetros planimétricos do loop, associado a um raio de 5000 metros**

Elem. n.º	KM INICIO Desenv.	RAIO	CLOTOIDE (A)		COORDENADAS (M) (P)		RUMO (Gr)
CLO. 1e	0+000,000 55,000		55,0	I	-57770,837	24996,741	31,518482
				F	-57737,429	25039,663	
	SECÇÃO	M	P		RUMO		
	8,333	-57766,850	25004,059		32,249221		
	16,667	-57762,696	25011,283		34,441437		
	25,000	-57758,215	25018,307		38,095132		
	33,333	-57753,262	25025,006		43,210305		
	41,667	-57747,717	25031,222		49,786955		
	50,000	-57741,498	25036,760		57,825084		
CUR. 1	0+055,000 -55,000	55,000		I	-57737,431	25039,665	63,349470
				F	-57698,880	24939,208	
				C	-57707,488	24993,530	
	SECÇÃO	M	P		RUMO		
	75,000	-57719,064	25047,298		86,499		
	100,000	-57694,282	25046,921		115,437		
	125,000	-57672,181	25035,702		144,374		
	150,000	-57657,250	25015,918		173,311		
	175,000	-57652,522	24991,588		202,248		
	200,000	-57658,956	24967,652		231,186		
	225,000	-57675,245	24948,972		260,123		
	250,000	-57698,083	24939,340		289,060		
	250,808	-57698,880	24939,208		289,995		
CLO. 1s	0+250,808 55,000		55,0	I	-57698,879	24939,210	353,657059
				F	-57752,425	24948,762	
	SECÇÃO	M	P		RUMO		
	258,333	-57706,367	24938,520		345,542213		
	266,667	-57714,692	24938,786		337,947014		
	275,000	-57722,941	24939,946		331,813294		
	283,333	-57731,063	24941,801		327,141051		
	291,667	-57739,056	24944,156		323,930286		
	300,000	-57746,951	24946,820		322,180999		
	305,808	-57752,425	24948,762		321,826070		



**Anexo J – Cálculo auxiliar para análise das diferenças algébricas na zona de divergência**

A autoestrada está em curva convexa:	1,115%
Raio	25000

		COTAS de Partida da autoestrada - <b>loop</b> - restabelecimento												
km		SE	-14	-11	-7,5	SE	rasante	SE	7,5	11	14	SE	14,75	
17+542,589	74,664	-10%	74,739	74,814	74,902	-2,5%	75,089	-2,5%	74,902	74,814	74,739	-10%	74,664	
17+550,000	74,746	-10%	74,821	74,896	73,298	-2,5%	75,171	-2,5%	74,983	74,896	74,821	-10%	74,746	
17+675,000	75,790	-10%	75,865	75,940	74,382	-2,5%	76,215	-2,5%	76,027	75,940	75,865	-10%	75,790	
17+683,333	75,837	-10%	75,912	75,987	74,403	-2,5%	76,262	-2,5%	76,075	75,987	75,912	-10%	75,837	i inst
17+694,070	75,894	-10%	75,969	76,044	74,459	-2,5%	76,319	-2,5%	76,132	76,044	75,969	-10%	75,894	0,509%
17+702,404	75,935	-10%	76,010	76,085	74,499	-2,5%	76,360	-2,5%	76,173	76,085	76,010	-10%	75,935	
17+710,737	75,973	-10%	76,048	76,123	74,536	-2,5%	76,398	-2,5%	76,211	76,123	76,048	-10%	75,973	i inst
17+719,070	76,009	-10%	76,084	76,159	74,570	-2,5%	76,434	-2,5%	76,246	76,159	76,084	-10%	76,009	0,409%
17+727,404	76,042	-10%	76,117	76,192	74,602	-2,5%	76,467	-2,5%	76,279	76,192	76,117	-10%	76,042	
17+735,737	76,071	-10%	76,146	76,221	74,631	-2,5%	76,496	-2,5%	76,309	76,221	76,146	-10%	76,071	



**Anexo K – Cálculo auxiliar para análise das diferenças algébricas na zona de convergência**

A rest. está em curva convexa:	5,000%
Raio	2000

COTAS de Partida do restabelecimento - <b>loop</b> - autoestrada								
km	-6,5	-3	SE	rasante	SE	3	6,5	
0+407,747	81,139	81,052	-2,5%	80,977	-2,5%	81,052	81,139	
0+450,000	82,806	82,718	-2,5%	82,643	-2,5%	82,718	82,806	
0+475,000	83,371	83,284	-2,5%	83,209	-2,5%	83,284	83,371	
0+500,000	83,624	83,537	-2,5%	83,462	-2,5%	83,537	83,624	inclinação instântanea
0+502,967	83,634	83,546	-2,5%	83,471	-2,5%	83,546	83,634	
0+520,657	83,598	83,510	-2,5%	83,435	-2,5%	83,510	83,598	

A rest. está em curva côncava:		-0,645%						
Raio		-1600						
0+520,657	83,598	83,510	-2,5%	83,435	-2,5%	83,510	83,598	
0+525,000	83,575	83,488	-2,5%	83,413	-2,5%	83,488	83,575	inclinação instântanea
0+523,688	83,581	83,493	-2,5%	83,418	-2,5%	83,493	83,581	
0+548,688	83,662	83,575	-2,5%	83,500	-2,5%	83,575	83,662	
0+573,688	84,134	84,047	-2,5%	83,972	97,5%	81,047	77,634	
0+622,985	86,209	86,122	-2,5%	86,047	197,5%	80,122	73,209	



**Anexo L – Parâmetros da diretriz da autoestrada (R=700 metros)**

Elemento	km	Raio		Coordenadas		Rumo	Rumo
				(M)	(P)	(gr)	(rad)
Curva	17525,679	-700,000	I	-57868,94	24858,378	44,534140	0,69954
	456,105		F	-57704,032	25275,064		
l (esquerda)			C	-58403,120	25310,778		
	17550,000			-57852,190	24878,949	42,32225	0,66480
	17575,000			-57837,122	24898,896	40,04861	0,62908
	17600,000			-57822,776	24919,369	37,77497	0,59337
	17625,000			-57809,171	24940,340	35,50132	0,55765
	17650,000			-57796,322	24961,785	33,22768	0,52194
	17675,000			-57784,248	24983,674	30,95404	0,48622
	17700,000			-57772,963	25005,980	28,68040	0,45051
	17725,000			-57762,481	25028,676	26,40676	0,41480
	17750,000			-57752,817	25051,730	24,13311	0,37908
	17775,000			-57743,982	25075,116	21,85947	0,34337
	17800,000			-57735,987	25098,802	19,58583	0,30765
	17825,000			-57728,844	25122,758	17,31219	0,27194
	17850,000			-57722,560	25146,954	15,03855	0,23622
	17875,000			-57717,144	25171,359	12,76490	0,20051
	17900,000			-57712,604	25195,942	10,49126	0,16480
	17925,000			-57708,944	25220,671	8,21762	0,12908
	17950,000			-57706,169	25245,515	5,94398	0,09337
	17981,784			-57703,925	25277,217	3,05336	0,04796



**Anexo M – Parâmetros e fórmulas das curvas de transição do ramo de ligação, associado a R=700 metros**

<b>Fórmulas da clotóide de entrada</b>	<b>Resultados</b>	<b>Variáveis</b>	<b>Resultados</b>
$\varphi = A^2/(2 \cdot R^2)$	0,50000	r1	29,402401
$\alpha = \varphi \cdot (200/\pi) \cdot (\sqrt{R^2/R})$	31,83099	M1	-57760,569
$x = A \cdot \sqrt{2 \cdot \varphi} \cdot ((1 - (\varphi^2/10)) + (\varphi^4/216) - (\varphi^6/9350))$	53,641	P1	24990,944
$y = A \cdot \sqrt{2 \cdot \varphi} \cdot ((\varphi/3) - (\varphi^3/42) + (\varphi^5/1320) - (\varphi^7/75600))$	9,002	R	55
$M_{tf} = M1 + c \cdot x \cdot \text{sen}(r1) + \text{abs}(R)/R \cdot y \cdot \text{sen}(r1 + 100)$	-57728,608	A	55
$P_{tf} = P1 + c \cdot x \cdot \text{cos}(r1) + \text{abs}(R)/R \cdot y \cdot \text{cos}(r1 + 100)$	25034,953	$\alpha 1$	31,83099
$M_c = M_{Tf} + R \cdot \text{sen}(r_f + 100)$	-57697,148	rf1	61,23339
$P_c = P_{Tf} + R \cdot \text{cos}(r_f + 100)$	24989,840	c	1
$r' = r1 + c \cdot \text{abs}(R)/R \cdot \alpha$	61,233390		
$r_f = r'$ se $0 < r' < 400$ ou $r_f = r' + 400$ se $r' < 0$ ou $r_f = r' - 400$ se $r' > 400$	61,233390		
$l1 = l2 = A^2/\text{abs}(R)$	55		

<b>Fórmulas da clotóide de saída</b>	<b>Resultados</b>	<b>Variáveis</b>	<b>Resultados</b>
$\varphi = A^2/(2 \cdot R^2)$	0,50000	r1	121,826070
$\alpha = \varphi \cdot (200/\pi) \cdot (\sqrt{R^2/R})$	31,83099	M1	-57742,085
$x = A \cdot \sqrt{2 \cdot \varphi} \cdot ((1 - (\varphi^2/10)) + (\varphi^4/216) - (\varphi^6/9350))$	53,641	P1	24945,072
$y = A \cdot \sqrt{2 \cdot \varphi} \cdot ((\varphi/3) - (\varphi^3/42) + (\varphi^5/1320) - (\varphi^7/75600))$	9,002	R	55
$M_{tf} = M1 + c \cdot x \cdot \text{sen}(r1) + \text{abs}(R)/R \cdot y \cdot \text{sen}(r1 + 100)$	-57688,540	A	55
$P_{tf} = P1 + c \cdot x \cdot \text{cos}(r1) + \text{abs}(R)/R \cdot y \cdot \text{cos}(r1 + 100)$	24935,517	c	1
$M_c = M_{Tf} + R \cdot \text{sen}(r_f - 100)$	-57697,148		
$P_c = P_{Tf} + R \cdot \text{cos}(r_f - 100)$	24989,840		
$r' = r1 + c \cdot \text{abs}(R)/R \cdot \alpha$	89,995081		
$r_f = r'$ se $0 < r' < 400$ ou $r_f = r' + 400$ se $r' < 0$ ou $r_f = r' - 400$ se $r' > 400$	89,995081		
$l1 = l2 = A^2/\text{abs}(R)$	55		

<b>Erro</b>	
M =	0,00001007153
P =	0,00000996754



**Anexo N – Parâmetros planimétricos do loop, associado a um raio de 700 metros**

Elem. n.º	KM INICIO Desenv.	RAIO (A)	CLOTOIDE (A)	COORDENADAS (M)	(P)	RUMO (Gr)
CLO. 1e	0+000,000 55,000	55,0	I	-57760,569	24990,944	29,402401
	SECCÃO	M	P	RUMO		
	8,333	-57756,828	24998,390	30,133140		
	16,667	-57752,916	25005,747	32,325357		
	25,000	-57748,671	25012,917	35,979052		
	33,333	-57743,944	25019,777	41,094225		
	41,667	-57738,608	25026,173	47,670875		
	50,000	-57732,576	25031,915	55,709004		
CUR. 1	0+055,000 -55,000	55,000	I	-57728,608	25034,953	61,233390
			F	-57688,542	24935,517	
			C	-57697,148	24989,840	
	SECCÃO	M	P	RUMO		
	75,000	-57710,505	25043,193	84,383		
	100,000	-57685,724	25043,640	113,320		
	125,000	-57663,263	25033,161	142,258		
	150,000	-57647,683	25013,885	171,195		
	175,000	-57642,148	24989,725	200,132		
	200,000	-57647,783	24965,589	229,070		
	225,000	-57663,443	24946,377	258,007		
	250,000	-57685,947	24935,992	286,944		
	252,638	-57688,542	24935,517	289,997		
CLO. 1s	0+252,638 55,000	55,0	I	-57688,539	24935,520	289,995081
			F	-57742,085	24945,072	
	SECCÃO	M	P	RUMO		
	258,333	-57694,200	24934,911	296,246055		
	266,667	-57702,527	24934,953	304,162237		
	275,000	-57710,799	24935,934	310,616942		
	283,333	-57718,951	24937,654	328,041971		
	291,667	-57726,971	24939,915	319,141918		
	300,000	-57734,883	24942,527	322,439951		
	307,638	-57742,085	24945,072	321,826070		



**Anexo O – Cálculo auxiliar para análise das diferenças algébrica na zona de divergência (R=700m)**

A auto-estrada está em curva convexa:	1,115%													
Raio	25000													
COTAS de Partida da autoestrada - <b>loop</b> - restabelecimento														
km		SE	-14	-11	-7,5	SE	rasante	SE	7,5	11	14	SE	14,75	
17+542,589	74,664	-10%	74,739	74,814	74,902	-2,5%	75,089	-2,5%	74,902	74,814	74,739	-10%	74,664	
17+550,000	74,746	-10%	74,821	74,896	73,298	-2,5%	75,171	-2,5%	74,983	74,896	74,821	-10%	74,746	
17+675,000	75,790	-10%	75,865	75,940	74,382	-2,5%	76,215	-2,5%	76,027	75,940	75,865	-10%	75,790	
17+683,333	75,837	-10%	75,912	75,987	74,403	-2,5%	76,262	-2,5%	76,075	75,987	75,912	-10%	75,837	i inst
17+692,061	75,884	-10%	75,959	76,034	74,449	-2,5%	76,309	-2,5%	76,121	76,034	75,959	-10%	75,884	0,517%
17+700,000	75,924	-10%	75,999	76,074	74,487	-2,5%	76,349	-2,5%	76,161	76,074	75,999	-10%	75,924	
17+708,333	75,963	-10%	76,038	76,113	74,525	-2,5%	76,388	-2,5%	76,200	76,113	76,038	-10%	75,963	i inst
17+716,667	75,999	-10%	76,074	76,149	74,561	-2,5%	76,424	-2,5%	76,236	76,149	76,074	-10%	75,999	0,419%
17+725,000	76,032	-10%	76,107	76,182	74,593	-2,5%	76,457	-2,5%	76,270	76,182	76,107	-10%	76,032	
17+733,333	76,063	-10%	76,138	76,213	74,623	-2,5%	76,488	-2,5%	76,301	76,213	76,138	-10%	76,063	



**Anexo P – Cálculo auxiliar para análise das diferenças algébrica na zona de convergência (R=700m)**

A rest. está em curva convexa:	5,000%
Raio	2000

COTAS de Partida do restabelecimento - <b>loop</b> - autoestrada							
km	-6,5	-3	SE	rasante	SE	3	6,5
0+407,747	81,139	81,052	-2,5%	80,977	-2,5%	81,052	81,139
0+450,000	82,806	82,718	-2,5%	82,643	-2,5%	82,718	82,806
0+475,000	83,371	83,284	-2,5%	83,209	-2,5%	83,284	83,371
0+500,000	83,624	83,537	-2,5%	83,462	-2,5%	83,537	83,624
0+513,946	83,630	83,542	-2,5%	83,467	-2,5%	83,542	83,630
0+520,657	83,598	83,510	-2,5%	83,435	-2,5%	83,510	83,598

inclinação  
instântanea  
-0,310%

A rest. está em curva côncava:	-0,645%
Raio	-1600

0+520,657	83,598	83,510	-2,5%	83,435	-2,5%	83,510	83,598
0+525,000	83,575	83,488	-2,5%	83,413	-2,5%	83,488	83,575
0+460,958	85,097	85,009	-2,5%	84,934	-2,5%	85,009	85,097
0+485,958	84,198	84,110	-2,5%	84,035	-2,5%	84,110	84,198
0+510,958	83,690	83,602	-2,5%	83,527	97,5%	80,602	77,190
0+622,985	86,209	86,122	-2,5%	86,047	197,5%	80,122	73,209

inclinação  
instântanea  
2,339%



**Anexo Q – Perfil Transversal tipo da autoestrada, restabelecimento e nó de ligação (2 peças desenhadas)**



**Anexo R – Planta geral do Nó de Ligação (1 peça desenhada)**



**Anexo S – Planta e Perfil para raio de 5000 (2 peças desenhadas)**



**Anexo T – Planta e Perfil para raio de 700 (2 peças desenhadas)**



**Anexo U – Planta de pormenor para raio de 5000 (1 peça desenhada)**



**Anexo V – Planta de pormenor para raio de 700 (1 peça desenhada)**