

U. PORTO

FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

**Modelação Procedimental de Ambientes Rodoviários
para
Simulação de Condução**



Carlos José Ribeiro Campos

Programa Doutoral em Engenharia Informática

Orientador: Prof. António Fernando Coelho

Coorientador: Prof. João Miguel Leitão

Copyright © Carlos José Ribeiro Campos, 2015

Para a minha família

Agradecimentos

Gostaria de começar por agradecer ao Professor Miguel Leitão, a confiança, o apoio, a dedicação, a paciência, os conselhos e a orientação científica prestada ao longo da realização deste trabalho. Gostaria também de agradecer os ensinamentos na elaboração dos artigos científicos e em particular o especial contributo na revisão da tese.

Gostaria também de agradecer ao Professor António Coelho, o incentivo na realização do meu trabalho de doutoramento, a disponibilidade na publicação e revisão dos artigos científicos. Gostaria também de agradecer o apoio contínuo, por acreditar na concretização deste trabalho e em especial o contributo na revisão da tese.

Aos professores Miguel Leitão e António Coelho o meu agradecimento por contribuírem para o meu desenvolvimento como docente e investigador.

Um agradecimento especial ao Professor Carlos Rodrigues, pelo apoio incondicional prestado, os conhecimentos transmitidos em engenharia de vias, a dedicação e os bons conselhos dados para levar a bom porto a realização deste trabalho.

Um particular agradecimento ao Professor Ângelo Jacob, pela amizade, o apoio, os ensinamentos em engenharia de vias e o indispensável acompanhamento.

Aos meus colegas do Instituto Superior de Engenharia do Porto, pela amizade, apoio e incentivo indispensáveis ao longo da realização deste trabalho.

Aos meus colegas de curso, a colaboração e o apoio prestados no desenvolvimento deste trabalho.

A todos os meus amigos, que apesar do meu afastamento não deixaram de estar presentes para apoiarem a realização deste projeto de investigação.

Aos meus pais pela compreensão da minha ausência e o apoio prestado durante o desenvolvimento desta tese.

O meu agradecimento a todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

O meu especial agradecimento, como não poderia de deixar de ser, à minha família, Patrícia, Lara e Tomás, por tudo!

Resumo

A utilização de ambientes virtuais para fins científicos, que envolvam simulação de condução, requerem modelos tridimensionais de estradas que obedecem aos elevados requisitos de especificação relativos a cada trabalho experimental. A criação de modelos rodoviários com este nível de detalhe requer a prévia definição das redes rodoviárias e dos respetivos traçados. Dependendo dos requisitos específicos de cada trabalho experimental, os traçados das estradas podem ser obtidos através do trabalho dedicado de especialistas em vias de comunicação. O recurso a especialistas de vias pode tornar o processo de obtenção de traçados demorado e dispendioso em termos de recursos.

A simulação de condução para fins científicos, para além do modelo visual, requer ainda uma descrição semântica de todo o ambiente gerado de forma a permitir a parametrização de atores, parametrização de eventos de tráfego, a produção de relatórios, entre outros.

Esta dissertação apresenta o trabalho desenvolvido no âmbito da conceção e implementação de um método integrado de geração procedimental de ambientes rodoviários adequados para simulação de condução para fins científicos.

O método proposto integra num único processo todas as fases de geração de ambientes rodoviários, desde os nós de ligação até à geração dos modelos geométrico e semântico. A geração de ambientes por fases, permite que o preparador do modelo possa interagir em qualquer etapa do processo no sentido de impor os requisitos específicos de cada trabalho experimental.

O método concebido reduz significativamente o recurso a especialistas em vias de comunicação para a elaboração de definições de redes e de traçados de estradas. O processo de geração de estradas foi inspirado nos métodos utilizados em engenharia de vias, produzindo traçados segundo as normas e as boas práticas em projeto de vias. Os traçados gerados possuem características geométricas semelhantes às estradas encontradas no mundo real.

A descrição semântica gerada permite a parametrização procedimental de atores no ambiente simulado, a produção de relatórios relativos à experiência realizada e a parametrização de eventos de tráfego específicos.

Os modelos rodoviários gerados são adequados à realização de trabalho científico no simulador de condução.

Abstract

The use of virtual environments aimed to scientific purposes, integrating driving simulation, require three-dimensional road models that must obey to the detailed standards of specification for these scientific experiments.

The creation of road models with this level of quality requires previous definition of the road networks and the road paths. Depending of each experimental work, the road paths can be obtained through the dedicated work of roadway design specialists, resulting in a long time consuming process.

The driving simulation for scientific purposes also requires a semantic description of all elements within the environment in order to provide the parameterization of actors during the simulation and the production of simulation reports, and others.

This thesis presents a method to automatically generate road environments suitable to the implementation of driving simulation experiences. This method integrates every required step for the modelling of road environments, from the interchanges nodes to the generation of the geometric and the semantic models. The human supervisor can interact with the model generation process at any stage, in order to meet every specific requirement of the experimental work.

The proposed method reduces the workload involved in the initial specification of the road network and significantly reduces the use of specialists for preparing the road paths of all roadways.

The proposed method was inspired in the procedures used in road engineering, producing road paths definitions according the design standards, current practices in road design, thus producing roads similar to those found in the real world.

The generated semantic description allows procedural animation of actors in the simulated environment. The models are thus suitable for conducting scientific work in a driving simulator.

Palavras-chave

Modelação Procedimental

Ambientes Rodoviários

Rede Rodoviária

Traçado Rodoviário

Projeto de Vias

Simulação de Condução

Key words

Procedural Modelling

Road Environments

Road Network

Road Layout

Road Design

Driving Simulation

Índice

Introdução	1
1.1 Motivação	3
1.2 Problema	4
1.3 Objetivos.....	6
1.4 Metodologia de investigação	7
1.5 Contribuições.....	7
1.6 Organização da tese	9
Simulação de Condução	13
2.1 Simulador de condução DriS	14
2.1.1 Sala de simulação e posto de condução	15
2.1.2 Sala de controlo e de preparação de experiências.....	16
2.1.3 Sistema de simulação e síntese de imagem.....	17
2.1.4 Sistema de projeção de imagem.....	18
2.1.5 Simulação de Som 3D.....	19
2.1.6 Painel virtual de instrumentos.....	20
2.1.7 Sistema ACC.....	21
2.1.8 Sistema Telnav	22
2.1.9 Sistema de feedback de força.....	23
2.1.10 Relatório de dados.....	23
2.1.11 Aplicações do simulador de condução DriS	25
2.2 Ambientes para simulação de condução.....	29
Vias de Comunicação	33
3.1 Rede rodoviária.....	34
3.2 Conceção de vias de comunicação	35
3.3 Programa preliminar	35
3.4 Estudo prévio	37
3.5 Projeto de execução	37
3.5.1 Traçado em planta	38
3.5.2 Perfil longitudinal	42
3.5.3 Perfil transversal	45
3.5.4 Taludes	46
3.5.5 Sinalização	47
3.6 Sinuosidade de traçados.....	48

3.6.1 Índice de sinuosidade.....	49
3.6.2 Índice de curvatura	50
3.6.3 Índice de curva.....	52
3.6.4 Análise no domínio da curvatura.....	52
Modelação de Ambientes Virtuais	57
4.1 Modelação de ambientes	58
4.2 Geração de redes	59
4.3 Geração de traçados	62
Geração de Ambientes Rodoviários	65
5.1 Nós de ligação	68
5.2 Rede topológica.....	69
5.3 Traçado de estradas	72
5.3.1 Definição de traçado rodoviário	72
5.3.2 Estudo de alternativas de traçado	73
5.3.3 Traçado de corredores	76
5.3.4 Vértices do corredor	78
5.3.5 Traçado em planta	79
5.3.6 Traçado em perfil longitudinal	81
5.3.7 Perfil transversal	84
5.4 Estrada e meio envolvente.....	86
5.4.1 Sinalização.....	86
5.4.2 Edição do modelo de terreno	88
5.5 Modelo semântico	90
5.6 Modelo geométrico	95
5.6.1 Modelo da estrada.....	95
5.6.2 Sinalização.....	96
5.6.3 Modelo do terreno	97
Implementação	99
6.1 Geração dos nós	100
6.2 Geração da rede topológica	101
6.3 Geração do traçado.....	102
6.3.3 Desenvolvimento do traçado em planta.....	103
6.3.4 Desenvolvimento do traçado em perfil longitudinal	103
6.3.5 Perfil transversal	104
6.4 Estrada e meio envolvente.....	105
6.4.1 Sinalização.....	105
6.4.2 Edição do modelo do terreno	105

6.5 Estrutura de dados.....	107
6.5.1 Definição da estrada.....	107
6.5.2 Definição da sinalização	109
6.5.3 Definição de objetos.....	111
6.5.4 Definição do terreno.....	112
6.6 Geração do modelo geométrico	113
6.6.1 Modelo da estrada	113
6.6.2 Sinalização	115
6.6.3 Modelo do terreno	116
Resultados	119
7.1 Rede rodoviária.....	119
7.2 Traçado rodoviário.....	126
7.2.1 Traçado dos corredores	127
7.2.2 Traçado em planta	137
7.2.3 Traçado em perfil longitudinal.....	142
7.3 Ambiente rodoviário	147
7.4 Modelo de ambiente rodoviário.....	150
Avaliação	157
8.1 Sinuosidade do traçado	158
8.1.1 Índice de sinuosidade	158
8.1.2 Índice de curvatura.....	158
8.1.3 Índice de curva	159
8.1.4 Análise no domínio da curvatura	160
8.2 Avaliação experimental	161
8.2.1 Avaliação por especialistas	162
8.2.1.1 Avaliação dos corredores	163
8.2.1.2 Traçado da estrada	165
8.2.1.3 Modelo visual.....	168
8.2.2 Avaliação por condutores jovens	169
8.3 Feedback dos participantes	171
Conclusões e Trabalho Futuro	173
9.1 Objetivos alcançados	174
9.2 Desenvolvimentos futuros	176
Referências Bibliográficas	179

Lista de Figuras

Figura 2.1	Arquitetura geral do simulador.	15
Figura 2.2	Sala de simulação e posto de condução.	15
Figura 2.3	Sala de controlo.	16
Figura 2.4	Blocos funcionais do simulador de condução.....	17
Figura 2.5	Sistema de simulação de som.	19
Figura 2.6	Painel de instrumentos.	21
Figura 2.7	Sistema ACC.....	21
Figura 2.8	Sistema <i>Telnav</i>	22
Figura 2.9	Sistema de feedback de força.....	23
Figura 3.1	Representação da clotóide (InIR, 2010).	39
Figura 3.2	Curva composta em planta.....	40
Figura 3.3	Combinação desejável de raios do traçado em planta (InIR, 2010).	42
Figura 3.4	Sinal da concordância.	43
Figura 3.5	Perfil longitudinal.	43
Figura 3.6	Sinal do trainel.	43
Figura 3.7	Representação esquemática da sobrelevação (InIR, 2010).....	46
Figura 3.8	Perfil transversal típico.	46
Figura 3.9	Sinalização de um cruzamento.	47
Figura 3.10	Estrada de montanha sinuosa.	48
Figura 3.11	Estrada sinuosa.....	49
Figura 3.12	Tangente ao arco no ponto S (Jia,2014).....	50
Figura 3.13	Curvatura de um traçado.	50
Figura 3.14	Representações do eixo da via (plano e orientação).	53
Figura 3.15	Representação do eixo da via pelo seno do azimute.	53
Figura 3.16	DFT para o traçado exemplo.....	54
Figura 3.17	DFT para o traçado da estrada nacional N105.....	54
Figura 3.18	DFT para o traçado da autoestrada A25.....	55
Figura 3.19	DFT para os traçados da autoestrada e estrada nacional.....	55
Figura 4.1	Geração do modelo visual em camadas (Smelik, 2008).	58
Figura 4.2	Ambiente rodoviário urbano (Thomas, 2000).	59
Figura 4.3	Rede hierárquica de estradas (Galín, 2011).	60
Figura 4.4	Visão da cidade (Teoh, 2008).	61
Figura 4.5	Geração de redes por <i>tensor fields</i> (Chen, 2008).	61
Figura 4.6	Geração da rede primária (Kelly, 2008).	62

Figura 4.7	Avaliação local da trajetória da estrada (Galín, 2010).	63
Figura 5.1	Arquitetura geral.	65
Figura 5.2	Refinamento da rede de autoestradas.	70
Figura 5.3	Rede de autoestradas gerada.	71
Figura 5.4	Rede topológica de estradas.	72
Figura 5.5	Geração do traçado da ligação.	72
Figura 5.6	Zona classificada.	73
Figura 5.7	Construção em ponte.	74
Figura 5.8	Construção em túnel.	74
Figura 5.9	Movimento de terras.	75
Figura 5.10	Volume do movimento de terras.	75
Figura 5.11	Geração dos vértices do corredor.	78
Figura 5.12	Curva composta simétrica.	79
Figura 5.13	Desenvolvimento da clotóide.	80
Figura 5.14	Levantamento da cota do terreno.	82
Figura 5.15	Concordância vertical.	82
Figura 5.16	Concordância em perfil longitudinal.	83
Figura 5.17	Ângulo de inclinação lateral.	85
Figura 5.18	Sobrelevação em curva.	86
Figura 5.19	Colocação da sinalização vertical.	87
Figura 5.20	Cota do terreno sob a via.	88
Figura 5.21	Cota do terreno com taludes.	89
Figura 5.22	Geração dos modelos geométricos.	95
Figura 5.23	Tira de triângulos.	95
Figura 5.24	Cálculo dos Vértices dos polígonos da via.	96
Figura 6.1	Arquitetura geral das implementações.	99
Figura 6.2	Geração de nós de ligação.	100
Figura 6.3	Aplicação interativa de geração da rede.	101
Figura 6.4	Geração do traçado por níveis.	102
Figura 6.5	Taludes de escavação e aterro.	106
Figura 6.6	Talude de escavação (esq.) e aterro (dir.).	106
Figura 6.7	Modelo da estrada.	114
Figura 6.8	Estrutura hierárquica da estrada.	114
Figura 6.9	Sinalização horizontal e vertical.	116
Figura 6.10	Ambiente rodoviário.	116
Figura 6.11	Divisão do terreno em células.	117
Figura 6.12	Árvore hierárquica do terreno.	117

Figura 7.1	Nós de ligação organizados por tipologia.....	121
Figura 7.2	Rede topológica de autoestradas.....	122
Figura 7.3	Rede topológica de estradas.....	122
Figura 7.4	Capitais de distrito ligas por autoestrada.....	123
Figura 7.5	Largura de referência para a estrada nacional.....	126
Figura 7.6	Largura de referência para a autoestrada.....	126
Figura 7.7	Ligação inicial entre dois nós.....	127
Figura 7.8	Hipóteses de traçado do corredor de 5 km de largura.....	128
Figura 7.9	Traçados em alinhamentos retos da nacional(esq.) e autoestrada(dir.).....	136
Figura 7.10	Traçado em alinhamentos retos e em planta.....	137
Figura 7.11	Traçado em planta da estrada nacional.....	138
Figura 7.12	Traçado em planta da autoestrada.....	140
Figura 7.13	Relevo do terreno e trainéis da estrada nacional.....	143
Figura 7.14	Relevo do terreno e trainéis da autoestrada.....	144
Figura 7.15	Vista 3D do traçado rodoviário da autoestrada.....	145
Figura 7.16	Traçados em altimetria da estrada nacional e autoestrada.....	145
Figura 7.17	Ambiente rodoviário da estrada nacional.....	147
Figura 7.18	Ambiente rodoviário da autoestrada.....	148
Figura 7.19	Ambiente rodoviário com sinalização de trânsito.....	148
Figura 7.20	Ambiente de simulação com veículos.....	149
Figura 7.21	Ambiente rodoviário com taludes de escavação e aterro.....	149
Figura 8.1	DFT para o traçado da estrada nacional gerada.....	160
Figura 8.2	DFT para o traçado da autoestrada gerada.....	161
Figura 8.3	Avaliação do traçado dos corredores.....	164
Figura 8.4	Avaliação do traçado da estrada nacional.....	166
Figura 8.5	Avaliação do traçado da autoestrada.....	166
Figura 8.6	Avaliação do ambiente rodoviário da estrada nacional.....	168
Figura 8.7	Avaliação do ambiente rodoviário da autoestrada.....	168
Figura 8.8	Avaliação dos ambientes e da simulação.....	170

Lista de Tabelas

Tabela 3.1	Extensão das redes rodoviárias previstas nos PRN 85 e PRN 2000.	34
Tabela 3.2	Extensão das retas em função da velocidade de base (InIR, 2010).	41
Tabela 3.3	Raios das curvas circulares em planta (InIR, 2010).	41
Tabela 3.4	Parâmetro (A) da clotóide (InIR, 2010).	39
Tabela 3.5	Inclinação máxima dos trainéis (InIR, 2010).	44
Tabela 3.6	Raios das concordâncias em perfil longitudinal (InIR, 2010).	44
Tabela 3.7	Índices de sinuosidade para rios (Mueller, 1968).	49
Tabela 3.8	Índice de sinuosidade para traçados de estradas reais.	49
Tabela 3.9	Índice de curvatura para traçados de estradas reais.	51
Tabela 3.10	Índice de curva para traçados de estradas reais.	52
Tabela 5.1	Matriz de ligações entre nós.	67
Tabela 5.2	Largura transversal de referência.	76
Tabela 5.3	Parâmetros utilizados para definição dos corredores (km).	77
Tabela 5.4	Piquetagem em perfil longitudinal.	84
Tabela 5.5	Caraterísticas do perfil transversal tipo (InIR, 2010).	84
Tabela 5.6	Definição dos corredores.	91
Tabela 5.7	Definição da estrada.	92
Tabela 5.8	Definição do traçado em planta.	92
Tabela 5.9	Definição do traçado em perfil longitudinal.	92
Tabela 5.10	Definição da sinalização horizontal.	93
Tabela 5.11	Definição de sinalização vertical.	93
Tabela 5.12	Definição de objetos.	94
Tabela 5.13	Movimentações de terras.	94
Tabela 5.14	Pontes e túneis.	94
Tabela 7.1	Nós de ligação e respetiva população.	120
Tabela 7.2	Extensão da rede real e da rede gerada (km).	123
Tabela 7.3	Definição topológica da rede de estradas.	124
Tabela 7.4	Tempos de geração de redes rodoviárias.	125
Tabela 7.5	Valores de custo dos indicadores considerados.	128
Tabela 7.6	Hipóteses de corredores de 5km largura (nacional).	130
Tabela 7.7	Hipóteses de corredores de 5km largura (autoestrada).	130
Tabela 7.8	Hipóteses de corredores de 1km de largura (nacional).	131
Tabela 7.9	Hipóteses de corredores de 1km de largura (nacional, cont.).	132
Tabela 7.10	Hipóteses de corredores de 1km de largura (autoestrada).	133

Tabela 7.11	Hipóteses de corredores de 1km de largura (autoestrada, cont.).	134
Tabela 7.12	Traçado final em alinhamentos retos (nacional).....	135
Tabela 7.13	Traçado final em alinhamentos retos (autoestrada).....	135
Tabela 7.14	Caraterização da estrada nacional.....	136
Tabela 7.15	Dados do traçado em planta (nacional).	139
Tabela 7.16	Dados do traçado em planta (autoestrada).....	141
Tabela 7.17	Dados do traçado em perfil longitudinal (nacional).	143
Tabela 7.18	Dados do traçado em perfil longitudinal (autoestrada).....	144
Tabela 7.19	Tempos de geração de traçados rodoviários.	146
Tabela 7.20	Definição do traçado em alinhamentos retos (m).	150
Tabela 7.21	Descrição do traçado em planta (m).	151
Tabela 7.22	Descrição do traçado em perfil longitudinal (m).....	151
Tabela 7.23	Especificação de um ambiente de simulação.....	152
Tabela 7.24	Especificação do perfil transversal.	153
Tabela 7.25	Especificação da sinalização horizontal e vertical.....	153
Tabela 7.26	Representação do eixo da via (vértices).	154
Tabela 8.1	Índice de sinuosidade dos traçados gerados.	158
Tabela 8.2	Índice de curvatura dos traçados gerados.....	159
Tabela 8.3	Índice de curva dos traçados gerados.	159

Capítulo 1

Introdução

A modelação procedimental de ambientes rodoviários é uma área de investigação de grande interesse, que se dedica à automatização da geração dos modelos tridimensionais dos elementos integrantes. Estes ambientes podem ter como vertente de aplicação, não só o entretenimento, mas também aplicações científicas, como a simulação de condução.

Uma alternativa à realização de experiências de condução em ambiente real é a simulação de condução que, para além de um evidente aumento das condições de segurança, permite o controlo e monitorização de diferentes variáveis difícil de atingir em condições de tráfego real.

Os simuladores de condução são cada vez mais uma ferramenta de estudo muito importante em áreas muito diversas, nomeadamente na psicologia, ergonomia e na engenharia rodoviária. Os simuladores permitem o controlo e estudo isolado de variáveis que podem influenciar o comportamento dos condutores, garantindo-se sempre as mesmas condições de realização dos testes experimentais. A simulação de condução permite a realização de estudos experimentais impraticáveis em contexto real, uma vez que reflete condições de total segurança para os participantes em eventos de tráfegos de alto risco, como por exemplo, o estudo de manobras de ultrapassagem com risco de colisão frontal.

Independentemente do objetivo do estudo, a realização de experiências num simulador de condução exige a prévia preparação de modelos de ambientes rodoviários representativos do país ou região que se pretende simular. As estradas constituintes de uma rede, devem possuir características geométricas semelhantes às encontradas no mundo real e serem concebidas de acordo com as normas de traçado em vigor e as práticas correntes em projeto de vias. Um modelo de um ambiente virtual com alguma complexidade pode facilmente atingir várias dezenas de quilómetros de estrada o que torna impraticável a sua especificação de forma manual. A geração de modelos de

estradas com o nível de qualidade exigido para simulação de condução requer a prévia definição dos traçados rodoviários. A conceção de traçados, quando realizada por especialistas da área de projeto, pode-se tornar numa tarefa demorada e bastante dispendiosa de recursos, mesmo recorrendo a ferramentas de auxílio, como o AutoCAD Civil 3D¹. A modelação procedimental de ambientes rodoviários apresenta-se assim como uma alternativa promissora para a produção de traçados realistas de redes de estradas.

Após serem obtidas as definições dos traçados da rede rodoviária é ainda necessário que o preparador do modelo despenda recursos para proceder à geração dos modelos geométricos. A geração de modelos geométricos de estradas a partir das definições dos traçados pode ser otimizada utilizando ferramentas de modelação automáticas (Campos, 2007b).

Adicionalmente, para além da geração dos modelos geométricos dos traçados, ainda é necessário proceder à edição do modelo de terreno em função das definições das estradas. Desta forma o modelo visual do ambiente rodoviário será apresentado sem falhas de integração entre os diferentes elementos constituintes da cena, estradas e terreno.

Para a preparação de experiências de condução é preciso criar um conjunto de informação relativa ao ambiente de simulação devidamente organizada e estruturada (Leitão, 2000). Os simuladores de condução destinados a estudo científico, tipicamente requerem duas representações distintas mas correlacionadas para especificar um mesmo ambiente.

Uma destas definições contém as representações geométricas dos objetos e as suas propriedades visuais e destina-se unicamente ao processo de visualização. Para a implementação desta representação utilizam-se frequentemente formatos de ficheiros conhecidos que permitem uma organização otimizada para a visualização em tempo real. Sempre que se deseje parametrizar o comportamento de atores ou avaliar desempenhos de participantes humanos, é fundamental que outros níveis de informação coexistam com a informação geométrica (Thomas, 2000; Ostadabbas, 2011).

A outra representação contém informação semântica, que facilita a consulta em tempo real do ambiente rodoviário. Esta definição inclui normalmente representações de alto nível da rede viária, dos veículos, da sinalização e de todos os outros elementos cuja consulta rápida é importante para a simulação e para o controlo dos cenários. Esta representação semântica é requerida para a colocação de atores, por exemplo peões ou outros veículos para além daquele que é conduzido pelo utilizador, que interagem diretamente com o ambiente dinâmico de simulação. Adicionalmente, é também

¹ www.autodesk.pt/products/autocad-civil-3d/overview

utilizada para a produção de relatórios relativos à experiência de simulação de condução realizada, possibilitando o posterior tratamento e análise de dados.

Na preparação destas representações, geométrica e semântica, deve ter-se um cuidado especial, nomeadamente na organização hierárquica da cena, pois dessa organização resulta uma boa qualidade da simulação. Assim como o desempenho dos sistemas de síntese de imagem pode ser drasticamente afetado pela qualidade das representações e organização dos modelos tridimensionais, também a eficiência dos processos de simulação física e produção de resultados é normalmente dependente da qualidade e organização da informação semântica integrada.

As ferramentas tradicionais de modelação de ambientes virtuais normalmente não permitem a criação conjunta destas duas representações, semântica e geométrica. Para permitir um processo totalmente controlável de geração dos ambientes rodoviários, deve ser possível ao preparador da experiência interagir ao longo do processo, editando as definições geradas em qualquer fase, de modo a impor os requisitos particulares de cada trabalho experimental.

1.1 Motivação

Os procedimentos utilizados na conceção e construção de vias rodoviárias encontram-se definidos e normalizados com sucesso no âmbito da implementação de estradas reais.

A modelação de ambientes rodoviários de acordo com os procedimentos utilizados em projeto de vias reais coloca-se como um enorme desafio a vencer, não só pela abrangência do tema à área científica de engenharia de vias como também na área da modelação 3D. Dedicando a este tema o esforço e o empenho merecidos, estou certo de que resultados de elevada qualidade poderão surgir.

A motivação pessoal para a realização deste projeto surge também no decurso do trabalho de investigação anteriormente desenvolvido, na área da computação gráfica. Desde o trabalho final de curso da licenciatura, em 2002, que estou envolvido na preparação de ambientes rodoviários adequados para a realização de experiências científicas no simulador de condução DriS da FEUP, onde tenho colaborado com equipas multidisciplinares em diversos projetos de investigação em múltiplas áreas científicas. Foi também no âmbito do DriS que realizei o trabalho de investigação apresentado na minha tese de mestrado em 2006, sobre a geração automática de ambientes rodoviários de grandes dimensões a partir de dados de projeto. O tema tem também um interesse prático para o aperfeiçoamento e melhoria do simulador de condução DriS, proporcionando uma rápida e eficiente preparação de experiências.

A realização deste trabalho de investigação vai também de encontro às necessidades das instituições às quais estou ligado, o Instituto Superior de Engenharia do Porto, como

docente e a Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, como aluno de doutoramento.

1.2 Problema

Os ambientes rodoviários requeridos para a realização de experiências científicas de simulação de condução podem frequentemente atingir várias dezenas de quilómetros. A grande extensão e quantidade de elementos integrantes, bem como os elevados requisitos de realismo do traçado, tornam a tarefa de criação destes ambientes rodoviários num processo muito complexo e dispendioso em termos de recursos.

Os requisitos de realismo do traçado rodoviário e meio envolvente, colocados aos ambientes destinados à realização de estudos científicos de comportamento de condutores, exigem a utilização de vias rodoviárias representativas dos ambientes habituais dos condutores participantes. Uma vez que os ambientes rodoviários reais são fortemente condicionados pelas normas técnicas impostas durante a fase de projeto, a satisfação destas imposições obriga à aplicação destas normas também aos ambientes rodoviários virtuais utilizados em experiências de simulação de condução.

Atualmente recorre-se a especialistas da área de projeto para desenvolver o traçado de uma estrada, que pode facilmente atingir várias dezenas de quilómetros. Apesar de existirem diversas ferramentas interativas de apoio ao projeto de vias rodoviárias reais e ferramentas de modelação de vias rodoviárias, não existe nenhum método de geração automática que integre as diferentes fases de projeto de uma rede viária e que permita facilitar significativamente o processo de preparação de modelos de ambientes rodoviários para simulação de condução.

As aplicações de projeto de vias de comunicação, como o AutoCAD Civil 3D, requerem demasiados conhecimentos técnicos da área de vias de comunicação e exigem uma exaustiva interação com o utilizador para produzir um projeto de uma estrada. Por outro lado não geram uma descrição semântica do ambiente rodoviário adequada para as necessidades da simulação em tempo real. A coexistência desta descrição semântica do ambiente com a tradicional representação geométrica utilizada na síntese de imagem é um dos requisitos fundamentais dos ambientes rodoviários para simulação de condução. Esta descrição de nível superior é fundamental para possibilitar a inclusão de atores (veículos nos diferentes sentidos, peões, entre outros), para a produção de eventos de tráfego e para a extração de resultados da simulação, entre outros.

Num ambiente corretamente preparado, ambas as representações, semântica e geométrica, devem coincidir de forma a evitar incoerências dos estímulos visuais obtidos. A criação destas duas representações de forma independente não permite garantir a sua coerência (consistência). O recurso a especialistas da área de projeto para obtenção dos traçados extensos não se apresenta como solução, uma vez que conduz a

que o processo de preparação de ambientes para simulação de condução se torne bastante demorado.

Considerando premente a necessidade de reduzir o recurso a especialistas no processo de geração de ambientes rodoviários para simulação de condução, a questão principal desta tese pode ser formulada da seguinte forma:

Como se pode tornar mais expedito o processo de geração de ambientes rodoviários para simulação de condução para fins científicos?

Considerando a ampla diversidade de focos de investigação que este tema pode abarcar e a falta de tempo útil para os abraçar a todos, nesta tese focou-se principalmente nas seguintes questões de investigação:

Será possível definir processos de modelação inspirados nos métodos tradicionais de conceção e projeto de vias que permitam a geração automática de modelos de traçados realistas adequados à simulação de condução?

A realização de experiências científicas de simulação de condução requer a rápida e eficiente preparação de ambientes rodoviários. Normalmente é fundamental que os traçados possuam características geométricas semelhantes às encontradas em estradas reais, habituais dos condutores participantes nos estudos científicos. Esta especificidade poderá ser cumprida mapeando os procedimentos utilizados em projeto de vias, produzindo traçados segundo as normas e as boas práticas.

Será possível, ao preparador, controlar o processo de modelação de forma a obter modelos de redes viárias cumprindo as especificações requeridas por cada caso experimental?

Cada ensaio experimental define um conjunto específico de requisitos que é necessário cumprir na preparação do ambiente virtual. Esta particularidade poderá passar por impor as especificidades de cada projeto, editando as definições geradas em cada fase do processo de preparação desses ambientes.

Será possível gerar modelos de estradas realistas a partir de dados disponíveis em projeto, levantamentos topográficos ou sistemas de informação geográfica?

O trabalho experimental em simulador não tem que ser realizado necessariamente a partir de traçados gerados procedimentalmente. Poderá existir trabalho experimental que imponha a modelação de um determinado traçado, por exemplo traçados já implementados na realidade. Deve ser mantida a possibilidade de preparar ambientes rodoviários a partir de dados de projeto ou de outras fontes.

A hipótese de investigação que se pretende demonstrar com a realização da dissertação pode ser enunciada da seguinte forma:

*“Através da **modelação procedimental** e mapeando os métodos de **conceção e projeto** de estradas utilizados em **engenharia de vias**, é possível gerar modelos de **ambientes rodoviários** realistas e adequados à **simulação de condução em tempo real**.”*

1.3 Objetivos

Com a realização deste trabalho pretende-se conceber um método que possibilite a modelação integral de ambientes rodoviários de forma mais expedita. Estes ambientes devem ser representativos de uma região ou país que se pretende modelar e adequados para simulação de condução.

De forma a aprofundar a questão de investigação, apresentada na secção 1.2, identificaram-se os seguintes objetivos:

- O processo de geração de um ambiente rodoviário deve poder ser totalmente autónomo, a fim de produzir definições de ambientes sem a necessidade de interação do preparador do modelo;
- Deve ser produzida uma definição topológica da rede rodoviária de estradas, tendo em consideração a distribuição de nós e a respetiva população associada;
- Inspirado nos procedimentos utilizados em engenharia de vias, o método a conceber deve gerar vias corretamente projetadas, de acordo com as normas de traçado e as práticas correntes em projeto;
- O método a conceber deve produzir definições de ambientes rodoviários típicos e semelhantes aos encontrados em traçado real, com a adequação do modelo do terreno à rede rodoviária gerada;
- A geração do ambiente rodoviário deve ser realizada por etapas de forma a permitir a interação do preparador do modelo em cada nível, impondo os requisitos particulares de cada trabalho experimental;
- O processo de geração de um modelo rodoviário deverá ser capaz de produzir definições de ambientes a partir de dados de projeto, levantamentos topográficos, sistemas de informação geográfica, ou outras fontes de informação adequada;
- Deve ser produzida uma descrição semântica do ambiente gerado, de forma a permitir a parametrização de eventos de tráfego, animação de atores e produção de relatórios relativos aos ensaios experimentais.
- Os modelos de ambientes rodoviários gerados procedimentalmente, geométrico e semântico, pelo método a conceber, devem possuir a qualidade e a descrição necessária a implementação de estudos científicos em simulador.

1.4 Metodologia de investigação

A metodologia de investigação seguida neste trabalho é qualitativa, baseada no desenvolvimento de um protótipo funcional concebido com base no método proposto e validado através de estudo de casos.

Com a realização deste trabalho pretende-se desenvolver um método de geração de ambientes rodoviários, com traçados definidos segundo as normas e as práticas correntes em projeto de vias, produzindo estradas semelhantes às encontradas no mundo real. Serão realizados estudos de sinuosidade do traçado no sentido de validar os modelos obtidos, comparativamente com estradas reais.

Para melhor validar os modelos obtidos procedimentalmente, serão realizados estudos experimentais, com a análise de dados de projeto dos traçados gerados e experiências de condução em simulador. A avaliação experimental deverá empregar dois métodos de análise, uma avaliação qualitativa baseada numa inspeção visual dos modelos apresentados no simulador de condução e uma avaliação das características geométricas com base em dados de projeto dos traçados gerados. A análise de dados do projeto dos traçados apresentados em simulação será realizada apenas por um grupo de especialistas em vias de comunicação. A avaliação qualitativa dos modelos apresentados em simulação será realizada por dois grupos de participantes, especialistas e não especialistas em projeto de vias.

Espera-se que a avaliação experimental a realizar possa ser útil não só para validar os modelos obtidos procedimentalmente, mas também para contribuir para a melhoria do método concebido, permitindo a produção de resultados segundo os requisitos desejados.

O protótipo funcional implementado será utilizado na preparação de ambientes rodoviários para a realização de estudos científicos no simulador de condução DriS.

1.5 Contribuições

A realização deste trabalho traduz-se num contributo inovador na geração procedimental integrada de ambientes rodoviários destinados a simuladores de condução. O método concebido, apresentado no capítulo 5, permite gerar de forma automática um ambiente rodoviário completo, reduzindo drasticamente o tempo e o custo envolvido na preparação do trabalho experimental a realizar no simulador.

Para possibilitar responder aos requisitos específicos de cada trabalho experimental, a geração de ambientes é realizada em níveis permitindo a interação do preparador do modelo em cada etapa do processo, editando o resultado produzido por cada módulo.

O módulo de geração de nós, apresentado na secção 5.1, permite obter uma definição de nós de interligação numa área geográfica, organizados por tipologia.

O módulo de geração da rede, apresentado na secção 5.2, permite obter uma definição topológica de uma rede rodoviária de forma rápida e eficaz sem necessidade de recorrer a especialistas de vias.

O módulo de geração de traçados, apresentado na secção 5.3, permite obter definições de estradas de diferentes tipologias, com características geométricas semelhantes às encontradas no mundo real. As estradas geradas possuem características de sinuosidade semelhantes às estradas reais, como se concluí pela análise de resultados, apresentada no capítulo 8. Os traçados produzidos cumprem as normas e as práticas de projeto, como comprovado pela avaliação experimental realizada por especialistas, apresentada na secção 8.2.1.

Tendo em consideração o modelo de terreno e as respetivas condicionantes, são produzidas definições de traçado em altimetria sem recurso a especialistas de projeto. O traçado em altimetria possibilita a obtenção de modelos de estradas com subidas e descidas, em perfeita coordenação com o relevo do terreno. A geração de traçados com sobrelevação, com altimetria e a inclusão de modelos terrenos com relevo na geração do modelo visual de estradas, constituem contributos inovadores na preparação de ambientes rodoviários. Para produzir modelos visuais de qualidade, o modelo de terreno é adequado aos traçados gerados (secção 5.4). Esta integração permitiu já desbloquear uma das maiores dificuldades de utilização de traçados com altimetria nas experiências de condução no simulador DriS.

O método proposto permite desenvolver modelos rodoviários de grandes dimensões e de elevada qualidade, reduzindo o tempo e os custos envolvidos na preparação de experiências de simulação de condução, uma vez que torna dispensável o recurso a especialistas da área de vias para obtenção da definição da rede e dos traçados rodoviários.

O principal contributo na realização desta investigação está na obtenção de modelos de redes de estradas, com características geométricas semelhante às encontradas no mundo real, sem a necessidade de recorrer a especialistas da área de projeto. Os modelos visuais gerados utilizam técnicas de otimização de visualização e consulta em tempo real, como por exemplo, a segmentação e hierarquização espacial.

O reconhecimento dos contributos mais relevantes pode ser constatado nas publicações científicas decorrentes deste trabalho de investigação que se enumeram a seguir:

- Publicação no *20.º Encontro Português de Computação Gráfica*, também publicada em capítulo do livro *Capítulo Português de la Sociedad de Educación del IEEE*, do trabalho de pesquisa e conceção do método para modelação procedimental de ambientes rodoviários para simulação de condução, apresentado no capítulo 5 (Campos, 2012a; Campos, 2012b);
- Publicação na *10.ª Conferência Ibérica de Sistemas e Tecnologias de Informação*, do trabalho de investigação sobre o método de geração de nós e do

método de geração de definições topológicas de redes rodoviárias, apresentados nas secções 5.1 e 5.2 (Campos, 2015c);

- Publicação no *21.º Encontro Português de Computação Gráfica*, do trabalho de investigação desenvolvido no âmbito da geração procedimental de traçados rodoviários realistas, apresentado na secção 5.3 (Campos, 2014);
- Publicação na *10th International Conference on Computer Graphics Theory and Applications*, do trabalho de investigação sobre método integrado de modelação de ambientes rodoviários para simulação de condução (Campos, 2015b);
- Aceite para publicação na *International Journal of Creative Interfaces and Computer Graphics*, do trabalho de investigação realizado no âmbito da geração e a avaliação dos ambientes rodoviários gerados procedimentalmente (Campos, 2015d).
- Publicação na *7th International Conference on Human-Computer Interaction*, do trabalho desenvolvido no âmbito da geração de modelos geométricos de ambientes rodoviários adequados para simulação de condução (Campos, 2015a).

1.6 Organização da tese

Neste documento, o capítulo 1 é dedicado à introdução, descrevendo a motivação para a realização deste trabalho, o problema na geração de ambientes rodoviários realistas para simulação de condução, apresentam-se os objetivos a alcançar na realização deste trabalho, descreve-se a metodologia de investigação adotada, e por último um resumo das contribuições inovadoras e publicações científicas mais relevantes no âmbito da realização desta tese de doutoramento.

No capítulo 2, dedicado ao tema dos simuladores de condução, apresenta-se, na secção 2.1 o simulador de condução DriS e os requisitos que os diversos subsistemas que o compõem devem possuir para permitirem a sua utilização em estudos científicos de comportamentos de condutores. Apresentam-se ainda, na secção 2.1.11 alguns dos trabalhos científicos mais relevantes realizados no simulador de condução DriS. Na secção 2.2 descrevem-se os requisitos que os ambientes rodoviário devem possuir para serem utilizados em simulação de condução para fins científicos.

No capítulo 3, na secção 3.1 apresenta-se o conceito e caracterização de uma rede rodoviária, em particular a rede rodoviária Portuguesa. Apresentam-se, na secção 3.2, os procedimentos instituídos em engenharia de vias de comunicação para conceção e projeto de vias rodoviárias. Nas secções 3.3, 3.4 e 3.5 são descritas com mais detalhe as diferentes fases de projeto de uma via rodoviária. Na secção 3.6 apresenta-se o conceito de sinuosidade aplicado a traçados rodoviários. São descritos os diferentes indicadores de sinuosidade estudados e são apresentados os resultados obtidos no estudo de sinuosidade de traçados reais de estradas.

No capítulo 4, são apresentados os trabalhos mais relevantes relacionados com a modelação de ambientes virtuais, onde na secção 4.1, são apresentados os trabalhos dedicados especificamente à modelação de ambientes rodoviários. Na secção 4.2 são apresentados os trabalhos desenvolvidos na geração de redes rodoviárias. Na secção 4.3 são referidos os trabalhos desenvolvidos mais relevantes na área da geração de traçados de estradas.

No capítulo 5, dedicado à apresentação do método proposto para a geração procedimental de ambientes rodoviários para simulação de condução, aborda na secção 5.1, a geração de nós de ligação e a sua organização por tipologia. A definição topológica da rede rodoviária é referida na secção 5.2. Na secção 5.3 é apresentada a geração do traçado rodoviário de estradas. A definição da sinalização e edição do modelo de terreno em função da rede rodoviária são descritas na secção 5.4. Na secção 5.5 é referida a interação com o preparador do modelo de ambiente e geração da descrição semântica. Uma abordagem a geração dos modelos geométricos é apresentada na secção 5.6.

No capítulo 6, dedicado à implementação do protótipo funcional para a geração de ambientes rodoviários, é descrita nas secções 6.1 e 6.2 a implementação do módulo de geração de nós e geração da rede topológica de estradas. É ainda apresentada a aplicação interativa desenvolvida no âmbito da geração da rede topológica. Na secção 6.3 é descrito o módulo de geração do traçado rodoviário de estradas, desde a geração de corredores, traçado em planta e traçado em perfil longitudinal. A implementação dos módulos de sinalização e edição do modelo de terreno é descrito na secção 6.4. Na secção 6.5 é descrita a estrutura de dados concebida para a especificação de um ambiente rodoviário. Por último na secção 6.6 é descrita a implementação do módulo de geração dos modelos geométricos das estradas, da sinalização e do modelo de terreno.

No capítulo 7, são apresentados os modelos produzidos pelo protótipo funcional implementado. Para demonstrar a funcionalidade do método concebido, são apresentados em detalhe dois tipos de traçado rodoviário, autoestrada e estrada nacional. Na secção 7.1 é apresentada a definição da rede rodoviária gerada. As definições dos corredores, dos traçados em planta e dos traçados em perfil longitudinal das estradas produzidas, são apresentadas na secção 7.2. Os modelos visuais dos ambientes gerados são apresentados na secção 7.3. Na secção 7.4 é apresentada a especificação de um modelo de ambiente de simulação.

No capítulo 8, são apresentados os resultados da avaliação realizada recorrendo aos indicadores de sinuosidade apresentados na secção 3.6. Estes resultados são discutidos na secção 8.1. Na secção 8.2 são apresentados os resultados da avaliação experimental realizada em laboratório recorrendo a especialistas da área de projeto e a utilizadores mais jovens. São apresentados e discutidos os resultados obtidos na análise de dados de projeto dos traçados concebidos e dos modelos visuais apresentados em simulação. Na

secção 8.3 são apresentados os comentários recebidos por parte dos participantes no decorrer da avaliação experimental em laboratório.

No capítulo 9, na secção 9.1 são apresentadas as conclusões finais retiradas da realização deste trabalho de investigação. Na secção 9.2 são apontados os desenvolvimentos futuros a realizar no sentido de melhorar o processo concebido de geração procedimental de ambientes rodoviários para simulação de condução.

Por último são apresentadas as referências bibliográficas que suportaram o desenvolvimento deste trabalho, nomeadamente no estudo do estado da arte, conceção e implementação do protótipo funcional.

Capítulo 2

Simulação de Condução

Um Simulador de condução define-se como sendo a união de um conjunto de elementos que interagem entre si, como por exemplo som e imagem, recriando situações de tráfego real, num ambiente virtual (Leitão, 1997). Assim, a simulação de condução apresenta-se com uma alternativa à realização de experiências de condução em ambiente real.

Os simuladores de condução com fins científicos são cada vez mais uma ferramenta de estudo importante em áreas diversas, como por exemplo a psicologia, a ergonomia e a engenharia rodoviária.

Em psicologia, os simuladores são importantes para a realização de estudos relacionados com a avaliação dos comportamentos dos condutores. Por exemplo, avaliar a interferência da realização de tarefas secundárias, como o uso de telemóvel, sistemas de navegação ou sistemas de informação de tráfego, na tarefa principal de condução. Os simuladores são também utilizados em ergonomia, para realização de estudos de interação do condutor com os sistemas embarcados (*In Vehicle Information System, IVIS*), como por exemplo sistemas de ajuda à navegação (*Global Positioning System, GPS*) ou sistemas de telefone móvel.

Em engenharia de vias, os simuladores de condução são usados para estudos dos traçados, não só os que ainda se encontram em fase de projeto, permitindo experimentar o traçado final com condutores reais, mas também os já implementados na realidade, possibilitando por exemplo o estudo de fatores que propiciem a condução de risco. Uma vez que as experiências se realizam em ambiente simulado, pode-se ainda elevar a prática de condução em situações de perigo, sem que daí resulte qualquer risco para o participante. Em engenharia de tráfego, possibilitam o estudo de manobras de ultrapassagem com risco de colisão frontal em vias com dois sentidos, o estudo da influência da largura das bermas na velocidade praticada pelos condutores, ou outros.

2.1 Simulador de condução DriS

O simulador de condução DriS (*Driving Simulator, DriS*) foi desenvolvido integralmente em Portugal por uma equipa multidisciplinar e pode ser classificado como um dos melhores simuladores de base fixa existentes na Europa (Leitão, 1997). O simulador de condução DriS encontra-se no laboratório de análise de tráfego, do departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

O seu desenvolvimento começou por volta do início da década de noventa, tendo vindo a ser melhorado a nível de *hardware* e *software*. A primeira arquitetura era constituída por uma estação gráfica *Silicon Graphics Onyx RealityEngine*, a qual obrigava a um sistema de ar condicionado vocacionado unicamente para a sala onde esta se encontrava instalada. Atualmente o simulador de condução é baseado num computador com processador Intel-Core i5 3.3GHz, com 8GB de memória RAM e com uma placa gráfica *Nvidia GeForce GTX460*.

Neste momento para além da arquitetura de simulação, pode-se contar com a presença de um veículo real, devidamente instrumentados, como posto de condução e com a possibilidade de simular feedback de força no volante (Campos, 2007a).

A arquitetura deste simulador pode ser dividida nos seguintes elementos:

- Sala de simulação e posto de condução;
- Sala de controlo e preparação de experiências;
- Sistema de simulação principal e síntese de imagem;
- Sistema de projeção de imagem;
- Simulação de som 3D;
- Sistema de painel virtual de instrumentos;
- Sistema de feedback de força no volante do veículo conduzido;
- Sistema ACC (*Adaptive Cruise Control*);
- Sistema de navegação;
- Módulo de produção de relatórios.

A arquitetura geral do simulador de condução encontra-se ilustrada na figura 2.1, onde se pode observar a integração dos diferentes sistemas.

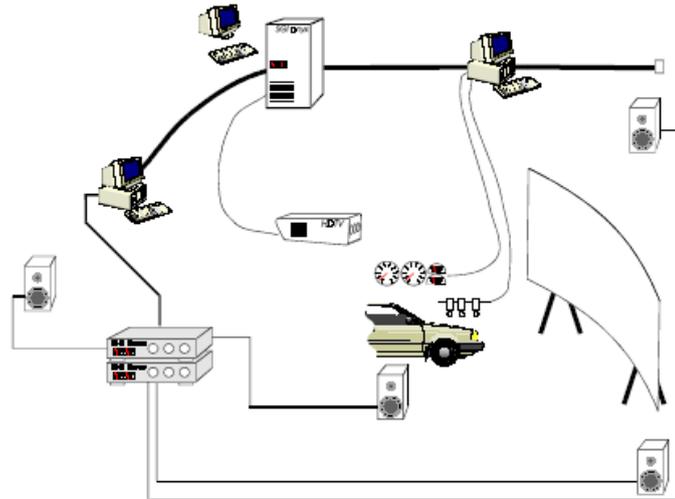


Figura 2.1 Arquitetura geral do simulador.

2.1.1 Sala de simulação e posto de condução

A realização de estudos experimentais de simulação de condução decorre numa sala especialmente preparada para o efeito. Esta sala onde se encontra o posto de condução, está revestida por um material que não propicia a reflexão de luz. Assim consegue-se um ambiente totalmente controlado durante a realização das experiências. Para permitir uma boa qualidade de projeção de imagem e total controlo de luminosidade, foram instaladas cortinas de material opaco de modo a não permitir a entrada de luz do exterior. Na sala de simulação pode-se encontrar um sistema de projeção de imagem, constituído por um projetor e uma tela. O posto de condução é constituído por um veículo real (Volvo 440 turbo) que foi instrumentado à medida. Na figura 2.2, apresentam-se imagens da sala de simulação e respetivo posto de condução.



Figura 2.2 Sala de simulação e posto de condução.

A instrumentação integrada no veículo inclui sensores de atuação nos pedais, da embraiagem, do travão e do acelerador. O veículo possui também instrumentação para

leitura da velocidade engrenada, indicadores de mudança de direção, leitura da posição da chave de ignição e leitura de todos os controlos de luzes.

A leitura da posição da embraiagem é efetuada através do acionamento mecânico, por rodas dentadas, de um potenciómetro de precisão. A medida de ação de sobre o pedal de travagem é obtida através de um transdutor de pressão instalado no circuito hidráulico de travagem próprio do veículo. A posição do pedal acelerador é obtida com um potenciómetro instalado na borboleta de combustível originalmente pertencente ao veículo. A indicação da velocidade engrenada pelo condutor é obtida através de uma caixa de velocidades previamente instrumentada pertencente a um autocarro, que foi devidamente instalada no veículo do simulador de condução. Foi também instalado um botão para comutar entre caixa automática e caixa manual, uma vez que o modelo de simulação do veículo permite essa possibilidade. Os sinais do controlo de luzes e de mudança de direção do veículo são obtidos diretamente dos interruptores que acionam estes equipamentos. A posição da chave de ignição é obtida diretamente do sistema original da chave do veículo, não alterando as funcionalidades originais. A informação dos sensores é recolhida por um sistema próprio de aquisição de sinal, que comunica com o sistema de simulação principal através de uma ligação *RS232*.

Na instrumentação do posto de condução existiu sempre o cuidado de manter a aparência original do habitáculo.

2.1.2 Sala de controlo e de preparação de experiências

A sala de controlo e preparação de experiências situa-se junto à sala de simulação. Nesta sala estão localizados todos os computadores associados à simulação de condução e equipamentos anexos de monitorização e controlo das experiências (figura 2.3). Durante a realização das experiências, o supervisor pode, a partir desta sala, acompanhar o desempenho do condutor, desencadear eventos em tempo-real e interagir com o condutor.



Figura 2.3 Sala de controlo.

É também neste local que se efetua o desenvolvimento do simulador e a preparação das experiências. Testes experimentais podem ser realizados utilizando um posto de

condução simplificado, constituído por um monitor e um conjunto de volante e pedais, com instrumentação adequada ao simulador.

2.1.3 Sistema de simulação e síntese de imagem

Da arquitetura geral do simulador de condução, destaca-se a estação gráfica baseada num computador, que gere toda a simulação, mantendo a base de dados de objetos da cena e efetuando tarefas de simulação física e de síntese de imagem.

O *software* de simulação foi desenvolvido de acordo com as especificidades do equipamento disponível, criando-se a aplicação Genes (*Generic Environment Simulator, Genes*), baseada em *OpenSceneGraph*².

Na figura 2.4, apresenta-se um diagrama com os blocos funcionais principais do simulador de condução. No centro encontra-se a representação do mundo simulado que inclui as definições visuais de todos os objetos existentes no mundo virtual, a representação lógica da rede viária e as representações dos comportamentos físicos dos atores e do veículo conduzido interactivamente.

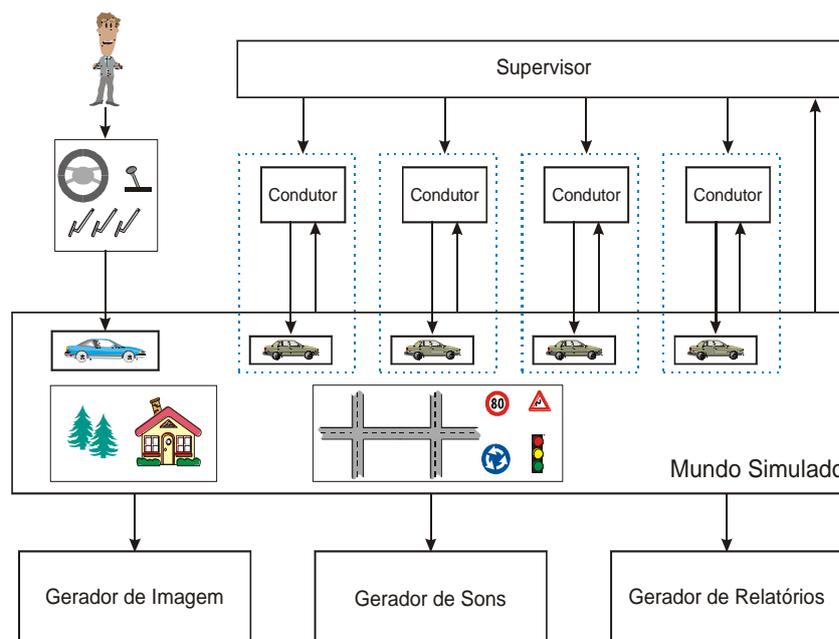


Figura 2.4 Blocos funcionais do simulador de condução.

O veículo conduzido está modelado fisicamente, tendo em consideração as características de um veículo real e pode ser dividido em dois blocos. O bloco da mecânica interna incorpora as descrições dos componentes mecânicos internos fundamentais de um veículo, nomeadamente o motor, a embraiagem, a caixa de velocidades, o travão e ainda um controlador automático da caixa de velocidades. As

² www.openscenegraph.org

informações recebidas dos pedais e da alavanca de velocidades são utilizadas pelos módulos respetivos para determinar o binário fornecido às rodas motoras. O bloco da dinâmica do corpo do veículo limita o binário recebido nas rodas em função da aderência dos pneus ao pavimento, combina a força resultante com as devidas à gravidade e ao atrito e determina a componente longitudinal da velocidade do veículo.

Para obter um maior realismo de simulação é importante a presença de outros veículos para além do veículo conduzido. A simulação do tráfego ambiente é implementada pela inclusão de outros veículos que podem seguir percursos pré-programados, reagir a eventos de tráfego determinados ou evoluir de forma autónoma, de acordo com o modelo comportamental definido.

O mundo simulado é constituído por definições de objetos puramente visuais, objetos animados ou com comportamento, e pela rede viária. O modelo visual da rede viária é criado em pré-processamento, em que alguns dos objetos integrantes, como por exemplo a sinalização vertical, podem ser definidos por referência a ficheiros externos de modelos 3D.

Na implementação atual, a estruturação de especificação de um ambiente no simulador de condução DriS, no ficheiro wdf (*World Description File, WDF*), permite a consulta bem como a edição de um ambiente de forma rápida e eficiente. O módulo independente de leitura de ficheiros wdf foi preparado para aplicar pré-processamentos de macros, utilizando o pré-processador *standard* da linguagem C e o pré-processador M4³.

2.1.4 Sistema de projeção de imagem

A imagem gerada pelo sistema de simulação principal é enviada através de um derivador *Barco universal VGA interface* a um projetor Barco Data 801s. Trata-se de um projetor de alta qualidade, com três sistemas de projeção de cor independentes (RGB), permitindo uma calibração de focagem independente e balanceada. Este projetor possibilita imagens com uma resolução de 1280x1024 *pixels*, a uma taxa de refrescamento de 50 Hz.

A imagem é projetada numa tela plana de material próprio para estes sistemas, situada numa das extremidades da sala, com a dimensão de 3,20 metros de largura por 2,40 metros de altura.

A imagem é gerada no sistema de simulação principal através de uma placa gráfica *GeForce GTX460*.

³ www.gnu.org/software/m4

2.1.5 Simulação de Som 3D

A integração de um sistema de som vai conferir à simulação de condução um ambiente mais próximo do real. Assim as experiências de simulação de condução são realizadas com a simulação da presença de inúmeras fontes sonoras distintas.

A arquitetura do sistema de som implementado divide-se em: computador para simulação e geração do som, grupo de dois amplificadores de áudio e grupo de quatro colunas de som. Na figura 2.5, ilustra-se a arquitetura geral do sistema de simulação de som do simulador de condução DriS.

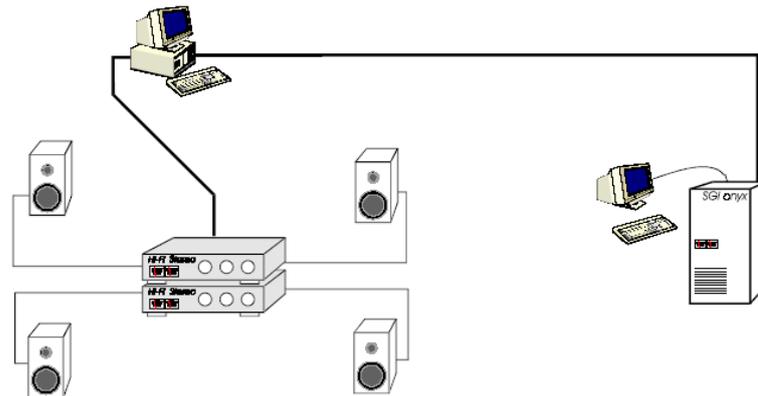


Figura 2.5 Sistema de simulação de som.

O sistema de simulação de som está implementado num computador comercial com duas placas de som *Sound Blaster AWE32* da *Creative Labs*, permitindo a reprodução de som em 4 canais independentes. Três desses canais estão associados à reprodução de som envolvente que para além da espacialização das fontes sonoras permite diversos efeitos acústicos como dispersão, absorção atmosférica, efeito de *Doppler*, bem como a fricção e a turbulência provocadas pelos objetos no seu deslocamento e a alteração do som gerado pelas fontes sonoras associadas a motores (Coelho, 1996; Coelho, 1998). Um dos canais está associado ao som do próprio veículo, reproduzindo os efeitos sonoros devido à velocidade do veículo, à rotação do motor e ao binário motor.

O processo de síntese de som é caracterizado pelas seguintes etapas: criação de fontes sonoras, instanciação dos sons aos objetos, propagação do som e composição dos sinais sonoros. A criação de fontes sonoras consiste em obter um conjunto de sons através de um processo de amostragem, não estando agregadas a nenhum objeto específico da cena. A instanciação consiste em associar fontes sonoras a objetos, obtendo-se entidades que possuem sons em conjunto com as propriedades tridimensionais dos objetos, como posição e velocidade. Também é possível modular dinamicamente as fontes sonoras de acordo com parâmetros de simulação, como rotação e binário motor. Na fase de propagação do som, procede-se à avaliação das transformações necessárias para determinar como o som produzido pelas fontes sonoras é recebido. Na composição dos sinais sonoros, calculam-se as transformações finais e misturam-se as contribuições de

todas as fontes sonoras, produzindo assim o sinal da cena completa que vai ser reproduzido pela coluna de som. O sistema de simulação principal envia periodicamente informação referente a cada um dos objetos.

O grupo de amplificadores está instalado na sala de controlo, permitindo ajustar o nível de volume pelo utilizador para cada situação de experiência. As colunas estão distribuídas na sala de modo a reproduzir um campo sonoro semelhante ao audível numa situação de condução normal.

2.1.6 Painel virtual de instrumentos

O painel de instrumentos virtual pode ser usado em substituição do painel analógico pertencente ao veículo, de acordo com os requisitos dos testes experimentais. O painel de instrumentos virtual foi desenvolvido de forma a reproduzir com detalhe o painel de instrumentos de um automóvel real. O painel de instrumentos foi desenvolvido num computador com sistema operativo *Linux*, utilizando o *Toolkit OpenGL Performer*⁴.

Adicionalmente, o painel de instrumentos virtual oferece maior flexibilidade de integração de funcionalidades, como por exemplo, mostrador do estado do sistema *Adaptive Cruise Control*, descrito na secção 2.1.7.

A comunicação com o sistema de simulação é efetuada via *Ethernet TCP/IP*, com transmissão da informação correspondente aos indicadores existentes no painel de instrumentos, nomeadamente:

- Velocidade do veículo;
- Rotação do motor;
- Temperatura do motor;
- Indicação do combustível;
- Primeira palavra com transmissão de informação ao bit, onde se pode consultar o estado da chave de ignição, piscas, luzes, travão de mão e luz de reserva de combustível.
- Segunda palavra com transmissão de informação ao bit, onde são utilizados 3 bits para a caixa de velocidades, estando os restantes 5 bits livres para implementações futuras.

O modelo visual do painel de instrumentos utilizado nesta implementação corresponde ao de um carro comercial (figura 2.6).

⁴ <http://oss.sgi.com/projects/performer>



Figura 2.6 Painel de instrumentos.

Todos os indicadores, ponteiros e luminosos, são atualizados em tempo real.

2.1.7 Sistema ACC

O ACC (*Adaptive Cruise Control, ACC*) é um *Advanced Driver Assistance*, que permite a manutenção da distância ao veículo da frente (*Time Headway, THW*) e a manutenção da velocidade, de acordo com as configurações predefinidas pelo condutor. A interação com o utilizador implementada segue o princípio de funcionamento da maioria dos sistemas ACC encontrados em veículos reais.

O controlo dos parâmetros do ACC é realizado pelo condutor, na parte esquerda do volante do carro (Volvo S80, modelo de 2012) e visualizados no painel de instrumentos, como se pode ver nas imagens da figura 2.7.



Figura 2.7 Sistema ACC.

Quando o sistema ACC é ativado pressionando o botão *ACC On/Off*, a velocidade atual é registada como velocidade desejada. Quando ACC está ativo, o condutor pode ajustar a velocidade desejada para um múltiplo superior ou inferior de 5 Km/h, usando um dos botões dedicados “+” e “-“. O tempo mínimo desejado de distância ao veículo da frente (DTH) é inicializado com um valor de 2 segundos e pode ser aumentado ou diminuído pelo condutor em quantidades de 0,5 segundos, usando os botões “↔” e “←→”. O ACC é desativado quando o condutor pressiona explicitamente o botão *ACC On/Off*, quando o pedal do travão é usado ou a velocidade do veículo descer abaixo dos 30 km/h. Uma vez desativado, o sistema ACC pode ser reativado para a mesma velocidade alvo,

pressionando o botão de *reload*. O estado *standby*, por vezes incluído em veículos reais, não foi considerado a fim de melhorar a generalização e a facilidade de uso.

O painel de visualização dedicado, localizado no painel de instrumentos virtual, permite ao condutor ser informado sobre o estado de ACC. Quando o ACC estiver ativo, o painel de instrumentos apresenta a velocidade desejada programada e tempo para o veículo da frente desejado. Quando um carro à frente for detetado, o tempo real, de distância para o veículo da frente, também é apresentada usando um elemento gráfico de leitura fácil, com barras multicoloridas. Há também um elemento de aviso que é ativado quando são detetadas situações de pré-colisão.

2.1.8 Sistema Telnav

Foi integrado um sistema interação multimédia no painel central do posto de condução. Este sistema integra um ecrã *touchscreen* de 7" instalado na consola central, como se mostra na figura 2.8.



Figura 2.8 Sistema *Telnav*.

O ecrã integrado no carro é controlado por um computador dedicado, com sistema operativo *Linux*, localizado na mala do carro. Para além de produzir as imagens apresentadas no ecrã e de receber as notificações de atuação no *touchscreen*, este computador também efetua a produção de som que é apresentado através do sistema de som original do veículo.

Foi desenvolvido um *software* servidor designado por *Telnav*, que recebe comandos por UDP e executa as respetivas tarefas. Através da comunicação UDP, podem ser recebidos comandos provenientes de qualquer máquina, inclusive do sistema de simulação. Assim é possível desencadear ações em função da posição na via de qualquer veículo simulado ou de eventos de tráfego.

Atualmente estão implementadas várias funcionalidades, como por exemplo: avisos multimédia (imagem, som e vídeo), sistema de telefone controlado por uma máquina de estados (chamar, atender, conversação, efetuar chamadas, entre outros), sistema de navegação, entre outros.

Este sistema de interação com o condutor foi já utilizado na realização de diversos estudos científicos no simulador de condução

2.1.9 Sistema de *feedback* de força

O posto de condução foi instrumentado com um sistema eletromecânico que permite a simulação de *force feedback* no volante, como se ilustra na figura 2.9.

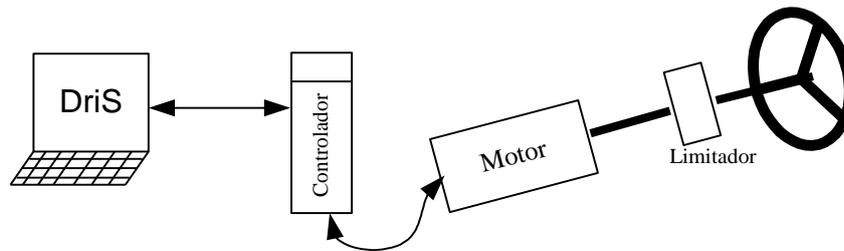


Figura 2.9 Sistema de feedback de força.

O *force feedback* é caracterizado pela força dinâmica sentida no volante, resultante dos efeitos dinâmicos exercidos diretamente nas rodas diretrizes do veículo, que por sua vez são transmitidos à coluna de direção e conseqüentemente ao volante.

A simulação de força é realizada por um servo motor de corrente alternada, que permite obter um binário motor nominal de 9,4 Nm. O controlo é efetuado por um controlador da *Control Techniques*, que para além de fornecer a alimentação ao motor, permite obter a posição do rotor através de um resolver incremental de 16384 pontos por revolução. A ligação do motor ao veio da coluna de direção é efetuada através de uma ligação flexível, com relação de transmissão 1:1. Foi implementado um sistema mecânico baseado em rodas dentadas, com a finalidade de limitar o número de voltas do volante.

O controlador do motor, por sua vez comunica com o sistema de simulação principal através da Porta *RS232*. Através desta comunicação, é enviada ao controlador a informação de binário a aplicar ao motor e o sentido de rotação. É efetuada uma comunicação bilateral, em que o controlador para além de outras informações envia ao sistema de simulação principal a posição do volante.

2.1.10 Relatório de dados

A produção de relatórios é um requisito muito importante em simuladores de condução, pois é a partir dos dados recolhidos de uma experiência que se fazem as análises fundamentais para satisfação dos objetivos de cada estudo.

O simulador de condução oferece a possibilidade de efetuar a gravação de um conjunto de dados para ficheiro, relativos à tarefa de condução realizada pelo participante,

permitindo uma posterior análise de uma série de variáveis associadas à simulação efetuada.

A gravação de dados relativos à condução é normalmente efetuada em tempo real a uma taxa de 10 Hz. Para que o processo de gravação não influencie de forma significativa a execução do ciclo de simulação, apenas as variáveis independentes são gravadas para ficheiro. As variáveis que são gravadas diretamente da simulação relativas ao veículo conduzido são:

- Instante de tempo em que é efetuada a gravação, relativa ao início da gravação de dados (segundos);
- Coordenadas xyz, relativas ao mundo virtual;
- Posição longitudinal do veículo, relativamente ao início da via (m);
- Velocidade longitudinal (k/m);
- Distância ao separador central (m);
- Distância à guia lateral (m);
- Ângulo das rodas, relativamente ao carro (graus);
- Ângulo de orientação absoluto do carro (graus);
- Ângulo de orientação do carro relativo à via (graus);
- Ângulo do volante (graus);
- Posição do acelerador (%);
- Posição do travão (%).

Em pós-processamento é efetuada a conversão do ficheiro binário para ficheiro em modo de texto e simultaneamente efetua-se um breve tratamento aos dados obtidos calculando-se um conjunto de variáveis dependentes predefinidas, como por exemplo, distância em segundos ao veículo da frente, média da velocidade longitudinal do veículo guiado, entre outras.

São produzidos relatórios referentes ao veículo conduzido assim como de outros veículos que façam parte do ambiente simulado. Muitas vezes, nas experiências de simulação de condução realizadas, existe a presença de um veículo que circula no mesmo sentido à frente do veículo conduzido, relativamente a esse são gravados os seguintes dados:

- Distância ao veículo da frente, em metros;
- Velocidade longitudinal do veículo da frente, em km/h.

Os relatórios são gerados independentemente para cada grupo de veículos, sendo gravado um ficheiro para o veículo conduzido e outro para os outros veículos.

As variáveis gravadas por cada um dos outros veículos são as seguintes:

- Instante de tempo em que é efetuada a gravação, relativa ao início da gravação de dados, em segundos;
- Coordenadas xyz, relativas ao mundo virtual;
- Posição longitudinal do veículo, relativamente ao início da via, em metros.

2.1.11 Aplicações do simulador de condução DriS

O simulador de condução DriS já foi aplicado para a realização de diversos estudos científicos no âmbito de segurança rodoviária, sistemas de ajuda à navegação, estudos da ergonomia de sistemas de interação com o condutor e estudos de comportamento de condutores.

Um dos estudos realizados neste simulador, na área da psicologia, foi o projeto europeu Haste (*Human Machine Interface And the Safety Traffic in Europe, Haste*) GRD1-2000-25361. Um dos objetivos deste projeto consistia em determinar a influência na tarefa de condução da realização de tarefas secundárias e de que forma estas interagem com a tarefa principal. Com este intuito, dois tipos de ensaios experimentais foram realizados, utilizando um protótipos de sistemas de informação, um de cariz auditivo e o outro de caráter visual. A realização da tarefa secundária tinha diferentes níveis exigência, de forma a avaliar o impacto de carga da realização da mesma e consequente efeito sobre a segurança rodoviária.

Para a realização dos ensaios experimentais foram implementados ambientes rodoviários, com modelos de estradas obtidos a partir de dados de projeto, parametrização eventos de tráfego e parametrização de veículos a circular nos dois sentidos. Os modelos das estradas com cerca de 80 km de extensão foram gerados proceduralmente recorrendo ferramentas desenvolvidas no âmbito do simulador de condução (Campos, 2007b). Os resultados obtidos foram usados na obtenção de um conjunto de normas a nível europeu para a implementação de sistemas de informação em veículos reais (Santos, 2005).

Outro estudo realizado no simulador de condução DriS, foi o projeto de investigação denominado “Tempo de Colisão e Sinistralidade Rodoviária”, com referência POCTI/ECM/11299/98. O objetivo deste projeto foi estudar qual o tempo de colisão frontal, entre o veículo que efetua a manobra de ultrapassagem e o veículo que circula em sentido contrário, no instante em que o veículo que efetua a manobra recolhe à sua faixa de rodagem (Jacob, 2006; Jacob, 2008). Também foi alvo de análise, o intervalo crítico entre veículos em sentido contrário, para realizar a manobra de ultrapassagem.

Para este estudo foi desenvolvido um ambiente rodoviário, com um modelo de uma estrada concebida para uma velocidade de base de 60km/h. Foram parametrizados

eventos de tráfego que potenciasses a manobra de ultrapassagem e parametrização de veículos nos dois sentidos.

O trabalho experimental consistiu na realização da tarefa de condução num traçado com cerca de 10 km e com 10 zonas de permissão de ultrapassagem. Quando o candidato entendesse efetuar uma manobra de ultrapassagem. À sua frente e imediatamente antes das zonas de ultrapassagem encontrava-se um veículo a circular no mesmo sentido, que quando o candidato se aproximava, iniciava a sua marcha e seguia com uma velocidade de 50 km/h. Nas zonas de permissão de ultrapassagem, faziam parte do meio ambiente, veículos a circular em sentido contrário, a uma velocidade de 65 km/h. O intervalo entre estes veículos podia variar entre 8 e 17 segundos.

Na área da psicologia, foi também realizado o projeto de investigação de avaliação de limiares de deteção de movimentos relativos em diferentes meios ambiente, com diferentes densidades de fluxo ótico, denominado “Ambientes Rodoviários e Deteção de Movimento” (Noriega, 2010). O objetivo do projeto consistia em avaliar tempos de perceção do movimento relativo, em diferentes meios ambientes. Os candidatos realizaram experiências de condução em três ambientes, com cerca de 30 km de extensão cada, com diferentes densidades de fluxo ótico. O primeiro ambiente, com mais densidade de fluxo ótico, era constituído por uma via com árvores nas bermas de ambos os lados e pavimento sombreado. O segundo ambiente com menor densidade de fluxo ótico que o primeiro era constituído por uma via com a presença de muros laterais com cerca de 2,5 m de altura de ambos os lados. O terceiro ambiente com menos densidade de fluxo ótico era constituído por uma via apenas com a representação do pavimento, sem qualquer meio envolvente, caracterizado como uma planície Alentejana.

Na área de engenharia de vias, o simulador foi utilizado para a realização do projeto “SafeSpeed” (Melo, 2012). A escolha da velocidade praticada pelos condutores é fortemente influenciada pelas características geométricas da estrada. Para avaliar como a velocidade é influenciada pela largura da seção transversal da estrada, neste estudo foram considerados dois tipos de estradas, com velocidades de projeto diferentes (40km/h e 80km/h). As estradas apresentadas aos condutores no simulador de condução correspondiam a troços da estrada nacional N105-2 e da estrada nacional N222.

Este projeto envolveu a criação de diferentes perfis transversais ao longo do traçado longitudinal, com zonas de transição entre os diferentes perfis. Envolveu ainda a parametrização de veículos a circular em sentido contrário de modo a criar um meio rodoviário mais realista e a quebrar a monotonia da tarefa de condução.

A validação dos dados obtidos no simulador foi confirmada através de uma análise comparativa das velocidades registadas em seis pontos de controlo nos ambientes reais e nos pontos de controlo equivalentes dos ambientes apresentados no simulador. A realização deste estudo confirmou a variação da velocidade praticada pelos condutores, para diferentes perfis transversais da estrada (faixa de rodagem). Por outro lado também

se verificou que a velocidade praticada pelos condutores não é condicionada pela largura das bermas, para a mesma largura da seção transversal da estrada (faixa de rodagem).

Na área da ergonomia, com objetivo estudar o impacto na tarefa de condução de múltiplos estímulos auditivos e visuais produzidos por sistemas de informação instalados no veículo, foi realizado no simulador o projeto de investigação com o título “In-vehicle Information and Communication System and the Driver Behaviour” (Pereira, 2008a; Pereira, 2008b). Neste trabalho experimental foram utilizados dois tipos de sistemas, um telemóvel e um sistema de navegação. A seleção desses equipamentos foi justificada pela alta frequência do uso de telemóvel e a cada vez maior aceitação e utilização de sistemas de navegação. O trabalho experimental em simulador permitiu avaliar e estudar a influência na tarefa de condução do uso de telemóvel e do uso do sistema de navegação. Essa influência foi avaliada através da análise da carga mental do condutor enquanto interage com esses sistemas embarcado e também pela identificação das principais alterações produzidas na tarefa de condução. Este estudo foi também orientado para identificar as diferenças relacionadas entre a idade de condutores adultos e condutores mais idosos, nestas condições de teste.

Os resultados obtidos revelaram para os condutores mais idosos, apresentam decréscimos de desempenho assinaláveis na tarefa de condução durante a interação com o sistema de navegação ou o telemóvel. Esses decréscimos foram identificados em variáveis de desempenho específicas e no comportamento da tarefa de condução. Sinais de níveis de carga cognitiva mais elevada, também foram revelados pelos participantes mais velhos, devido principalmente à ocorrência de situações de quase-acidente.

Este projeto envolveu a modelação de cruzamentos, rotundas, colocação de sinalização vertical e parametrização de outros veículos. O ambiente rodoviário desenvolvido permitia manter o plano de percurso até ao destino final, independentemente da decisão tomada pelo condutor em qualquer interseção de estradas. Esta especificidade foi implementada com recurso a portais virtuais, colocados em todas as estradas de saída de qualquer interseção.

Na área da ergonomia e segurança rodoviário foi realizado no simulador um estudo experimental que envolveu o uso do sistema ACC (*Adaptive Cruise Control, ACC*) instalado no carro (Giulio, 2013; Giulio, 2014). O ACC é um sistema de auxílio ao condutor que mantém a velocidade predefinida e a distância do veículo da frente.

O presente estudo tinha como objetivo avaliar se os condutores tinham a perceção do risco e da carga mental associada ao uso do ACC, analisando a posição das mãos no volante. Tinha ainda como objetivo compreender o efeito da pesquisa de conforto na colocação das mãos no volante.

Este trabalho experimental teve também como objetivo investigar o efeito da experiência adquirida com o uso de ACC na velocidade adotada e na manutenção da distância ao veículo da frente. Foi ainda explorado o impacto da utilização da ACC na velocidade e

na distância ao veículo da frente para utilizadores habituais do ACC e condutores regulares.

O trabalho experimental no simulador de condução foi realizado com a participação de 26 candidatos, os quais conduziram duas vezes no mesmo percurso, uma com ACC e outra manual.

Para este estudo foi concebido um ambiente de autoestrada com cerca de 50 km de extensão, com a colocação de guardas de proteção, sinalização e parametrização de veículos nos dois sentidos. Foram ainda parametrizados eventos de tráfego, como por exemplo: obras, zonas de nevoeiro e veículos avariados na via da esquerda. A geração do modelo da estrada foi realizada a partir de dados de projeto de uma autoestrada real (A25) e recorrendo às ferramentas previamente desenvolvidas (Campos, 2007b).

Os resultados mostraram que a colocação das mãos no volante não é influenciada pelo uso do ACC. Além disso, não foram encontradas diferenças entre o uso de ACC e condução manual, na carga mental e perceção de risco. Os resultados também mostram que o uso de ACC trouxe uma pequena, mas não significativa, redução da velocidade e principalmente uma redução da distância ao veículo da frente. A redução de velocidade e distância foi mais significativa para os utilizadores habituais do ACC, provavelmente como consequência da sua experiência na utilização do sistema.

Na área do Design, foi realizado no simulador um estudo com o objetivo de avaliar a consonância da tomada de decisão dos condutores, quando durante a tarefa de condução, são confrontados com uma situação de emergência e simultaneamente recebem informações de trânsito no sistema de navegação (visual e audiovisual).

O estudo envolvia dois tipos de avisos a mostrar no painel, um estático e outro multimodal. O aviso estático era desencadeado durante a simulação de condução mostrando imagens estáticas de informação de trânsito. O aviso multimodal também era desencadeado durante a tarefa de condução, mas mostrando uma imagem animada com a reprodução de uma mensagem sonora. O objetivo do projeto consistia em avaliar as respostas (obediência) dos condutores, perante os dois tipos de avisos em situações de tomada de decisão num cruzamento.

Foi utilizada uma metáfora altruísta no que se refere à narrativa utilizada com o condutor. A mensagem sonora inicial reproduzida a partir de uma gravação, antes do início da simulação indicava a urgência em levar uma criança ferida, para o hospital o mais rápido possível.

O trabalho experimental realizado no simulador de condução utilizou ambientes rodoviários realistas produzidos pelo protótipo funcional apresentado no capítulo 6.

Ao longo do percurso de 10km foram parametrizados eventos que pudessem gerar situações de *stress*, nomeadamente a utilização de sirenes de ambulância e choros de criança. As conclusões preliminares relevam que os participantes confrontados com a

posição de tomada de decisão, na sua maioria ignoraram as mensagens do sistema de navegação.

Um projeto de investigação na área dos jogos sérios, atualmente a decorrer no simulador, tem como principal objetivo a certificação de competências de condução (Batista, 2013). As métricas de competência implementadas neste projeto permitem acompanhar de forma individualizada a evolução do desempenho do aluno e a correspondente validação do treino face aos planos/ missões predefinidos e aos objetivos de aprendizagem. Esta abordagem foi elaborada para o contexto de aprendizagem da carta de condução, onde se tenta usar os jogos sérios como ambientes virtuais de aprendizagem, com o intuito de reduzir os índices de acidentes registados entre os jovens pré-encartados.

Com a utilização do simulador pretende-se testar a aplicação do conceito de validação de competências no controlo e domínio da viatura (operacional), bem como de adaptação às constantes alterações ocorridas no ambiente rodoviário (tático) da matriz de *GDE – Goals for Driver Education* (Engstrom, 2003). Para a preparação dos ambientes rodoviários específicos para este projeto, foi utilizado o protótipo funcional apresentado no capítulo 6.

A abordagem concebida permite a configuração dos treinos de forma automática, utilizando uma análise contínua das métricas de performance do aprendiz. Durante o treino, pode ser utilizado um módulo de comunicação de mensagens (feedback) para a interação em tempo real entre o instrutor e o aprendiz.

2.2 Ambientes para simulação de condução

Para a realização de estudos científicos em simuladores de condução é necessária a prévia preparação de ambientes rodoviários. Estes ambientes rodoviários, em função do tipo de trabalho experimental, terão que obedecer rigorosamente às especificações do estudo. Destas especificações podem constar, como por exemplo a inclusão de sinalização, cruzamentos, rotundas, tipo de pavimento, entre outros elementos rodoviários típicos. Para além destes requisitos, estes ambientes podem também ter como especificação a modelação de estradas de grandes dimensões, atingindo frequentemente várias dezenas de quilómetros. Estas especificações podem ser de tal ordem complexas, detalhadas e particulares que impliquem um controlo cuidado na geração do modelo virtual.

Para a preparação de experiências de condução é ainda necessário gerar um conjunto de informação relativa ao ambiente de simulação devidamente organizada e estruturada. Sempre que se deseje incluir participantes virtuais ou avaliar desempenhos de participantes humanos, é fundamental que outros níveis de informação coexistam com a informação geométrica. É vulgar encontrar, nos simuladores de condução destinados

a estudo científico, duas bases de dados distintas mas correlacionadas para especificar um mesmo cenário.

A forma como se organizam os diversos componentes de uma cena é também uma questão importante. O desempenho dos sistemas de síntese de imagem pode ser drasticamente afetado pela qualidade da representação e organização dos ambientes modelados (Leitão, 2000). Uma destas bases de dados destina-se unicamente ao processo de visualização e contém as representações geométricas dos objetos e as suas propriedades visuais. Para a implementação desta base de dados utilizam-se frequentemente formatos de modelação conhecidos que permitem uma organização otimizada para a visualização em tempo real. A base de dados semântica contém uma representação de alto nível da cena, onde são estabelecidas as propriedades dos objetos, os seus atributos característicos e a relação entre os diferentes objetos que integram o ambiente rodoviário virtual. A base de dados semântica deve incluir representações de alto nível da rede viária, dos veículos, da sinalização e de todos os elementos cuja consulta rápida possa ser importante para a simulação e para o controlo dos cenários. Desta base de dados deve constar, por exemplo, a representação topológica da rede rodoviária e as definições dos traçados das vias. Essa informação é crucial durante a simulação para, por exemplo, determinar a localização de veículos e atores no ambiente rodoviário, analisar desvios de trajetória do veículo conduzido, calcular do tempo de colisão para o veículo da frente, despoletar eventos, ou outros parâmetros dinâmicos.

A possibilidade de incluir atores é crucial para o realismo de uma simulação visual interativa. Quando se pretende estudar o tempo de reação de um condutor a uma situação de tráfego inesperada, como por exemplo: o aparecimento repentino, no campo de visão, de outros veículos, peões a atravessar a rua, entre muitas outras situações. Thomas et al. apresentam uma cidade virtual em que é possível encontrar diferentes atores, como: peões, veículos a circular nos diferentes sentidos, transportes públicos e veículos conduzidos por outros condutores, num complexo ambiente rodoviário urbano (Thomas, 2000). Ostadabbas et al. apresentam um trabalho onde referem também a importância da inclusão de atores, parametrização de eventos de tráfego, na simulação de condução para fins científicos (Ostadabbas, 2011).

Uma simulação realista da condução, tal como referido nos trabalhos de Thomas et al. e Ostadabbas et al., deve portanto incluir outros veículos para além daquele que é conduzido pelo utilizador, peões, rede de transportes públicos, entre outros. A parametrização de atores é crucial para o realismo de uma simulação visual interativa. Para que esses acontecimentos dinâmicos sejam despoletados durante a simulação é necessário garantir a existência de uma base de dados semântica. A necessidade da criação de uma descrição semântica de acordo com o mapa rodoviário é também referida em outros trabalhos relacionados (Campos, 2007b; Bayarri, 1996; Pareja, 1999). A adição de peões pode também ser fundamental para uma simulação convincente de determinados tipos de ambientes rodoviários, com por exemplo, meios urbanos.

Sumário

Neste capítulo foi apresentado o simulador de condução DriS, instalado no laboratório de análise de tráfego do departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Este simulador encontra-se operacional desde o início da década de noventa, sendo considerado um dos melhores simuladores de base fixa. Foi apresentada a sua arquitetura geral e foram descritos os seus módulos funcionais. O simulador de condução foi já utilizado na realização de experiências científicas nas mais diversas áreas, tendo sido apresentados alguns dos trabalhos mais relevantes. Por último, foram referidos os requisitos que os ambientes rodoviários devem possuir para a realização de estudos científicos em simulador.

Capítulo 3

Vias de Comunicação

As infraestruturas rodoviárias são projetadas para interligar pontos de interesse, permitindo a movimentação de pessoas e bens entre os diversos nós da rede. A construção de uma estrada obedece primeiramente a uma definição de traçado.

Neste capítulo descrevem-se os conceitos gerais associados ao planeamento de uma rede rodoviária, em engenharia de vias de comunicação. Faz-se referência ao Plano Rodoviário Nacional (PRN) e à classificação de estradas por categorias. Apresenta-se, para Portugal, uma breve caracterização da rede rodoviária por categoria e a respetiva extensão, segundo os relatórios das entidades competentes (IMT - Instituto da Mobilidade e dos Transportes, IP).

Descrevem-se os conceitos gerais associados ao planeamento, conceção e implementação de traçados rodoviários. O projeto de uma estrada desenvolve-se em várias etapas, sendo o traçado em planta o primeiro a ser realizado, seguindo o traçado em perfil longitudinal e a definição do perfil transversal. Uma das últimas tarefas a ser realizada é a sinalização, onde são sempre incluídos dois tipos de sinalização, um referente à marcação horizontal e a outro referente à sinalização vertical.

Por último, é apresentada uma discussão sobre avaliação de sinuosidade de traçados rodoviários, onde são introduzidos diversos indicadores: índice de sinuosidade, índice de curvatura e índice de curva. São apresentados os resultados utilizando estes indicadores para traçados reais do tipo estrada nacional e autoestrada. Por último é apresentado o estudo de sinuosidade de traçados realizado no domínio da curvatura, recorrendo à transformada discreta de Fourier.

3.1 Rede rodoviária

Uma rede rodoviária tem como objetivo servir as necessidades de deslocação das populações, serviços, entre outros. O planeamento de uma rede deve portanto ir ao encontro das necessidades dos utilizadores e em simultâneo tentar minimizar os custos de construção, os custos de operação, e minimizar os impactos desta no meio ambiente.

Os custos de construção estão associados à implantação da via em terreno real, onde se englobam os custos da própria via e também os custos com aterros, terraplanagens, expropriações, entre outros. Os custos de operação estão relacionados com a deslocação veículos entre dois pontos na rede. No cálculo do custo de operação são avaliados vários fatores, como por exemplo: combustível, extensão do percurso, tempo de duração da viagem, entre outros.

Em Portugal, existe um documento designado por Plano Rodoviário Nacional (PRN), com a última publicação em 2000, onde está definida a Rede Nacional de Estradas de Portugal. O Instituto da Mobilidade e dos Transportes (IMT) tem como competências o acompanhamento da execução do Plano Rodoviário Nacional. Este documento é elaborado, tipicamente, com uma periodicidade de 10 anos, por análise da rede rodoviária nacional existente. O mapa da rede nacional de estradas publicado em 2000 pode ser consultado em (EP, 2012).

Na última versão do Plano Rodoviário Nacional, a rede rodoviária nacional é definida apenas pela rede fundamental e pela rede complementar. Na rede fundamental são contemplados os itinerários principais (IP's), e as autoestradas (AE's). Na rede complementar são contemplados os itinerários complementares (IC's), e estradas nacionais (EN's).

O Plano Rodoviário Nacional refere-se ainda às Redes de Estradas Municipais e cria um novo grupo de estradas, as Estradas Regionais (ER's), a partir da transformação de parte das antigas EN's. Na tabela 3.1, são apresentadas as extensões aproximadas da rede rodoviária prevista no PRN de 1985 e no PRN de 2000 (IMT, 2011).

Tabela 3.1 Extensão das redes rodoviárias previstas nos PRN 85 e PRN 2000.

Estrada	PRN 85 (km)	PRN 2000 (km)
IP's	2600	2600
IC's	2500	3400
EN's	4800	5300
ER's	-	5000
Total	9900	11300

Como se pode ver pela tabela 3.1, a rede rodoviária nacional do PRN de 1985 com cerca de 9 900 km, foi alargada para 11 300 km em 2000, através da inclusão e reclassificação de novos percursos, acrescida ainda pela rede de estradas regionais.

As necessidades de ligações rodoviárias futuras, podem ser estabelecidas partindo da análise da rede global de estradas existente. A análise e estudo das necessidades rodoviárias são da responsabilidade do grupo de planeamento. Este organismo é responsável por comunicar às instâncias superiores, decisores políticos, as necessidades futuras a nível da rede rodoviária nacional.

Em Portugal, a rede complementar tende a estabilizar, existindo apenas pequenos focos de novas construções. Essencialmente, são realizadas obras de conservação e manutenção. Na grande maioria, as novas vias rodoviárias a construir serão do tipo autoestrada ou vias rápidas, que em alguns casos podem resultar da conversão de estradas de outro tipo.

3.2 Conceção de vias de comunicação

A conceção de uma via parte inicialmente por uma decisão estratégica de que nós na rede existente, a nova estrada irá interligar. Esta decisão é tomada tendo em consideração parâmetros como:

- Custo de construção: fator preponderante no planeamento estratégico de uma nova via;
- Nível de serviço: classificado de A a E, estando relacionado com a intensidade de tráfego previsto para a via;
- Planeamento:
 - Crescimento demográfico;
 - Estudos de tráfego;
 - Estudos publicados pelo Instituto Nacional de Estatística.

Em engenharia de vias, um projeto de uma estrada desenvolve-se de acordo com as seguintes fases: programa preliminar, estudo prévio e projeto de execução (França, 2011). A definição do traçado deverá obedecer aos critérios estabelecidos nas normas aplicáveis (InIR, 2010).

3.3 Programa preliminar

A elaboração do programa preliminar parte de uma decisão estratégica de que via irá ser construída. O programa preliminar é basicamente um caderno de encargos base, constituído por disposições gerais, com pouca pormenorização, onde figuram as características gerais pretendidas e que condicionaram logo à partida a escolha do traçado.

Na elaboração do programa preliminar são considerados diversos fatores:

- Pontos fixos, pontos obrigatórios de passagem previamente definidos pelo dono da obra e que poderão ser localidades, centros industriais entre outros pontos de interesse e que a estrada deverá servir;
- Existência de condicionantes, que vão influenciar o traçado da estrada;
- Elementos básicos que permitem a definição de características geométricas mínimas ou máximas;
- Velocidade de base;
- Nível de serviço, relacionado com a densidade de tráfego.

No programa preliminar são ainda estudados os seguintes aspetos:

- Características geométricas, onde são definidos raios mínimos das curvas em planta, inclinação máximas dos trainéis e raios mínimos das concordâncias verticais;
- Características topográficas, características relacionadas com a topografia do terreno, com as quais se pretende minimizar grandes movimentações de terras para não elevar os custos da obra;
- Hidrologia, relacionada com a precipitação esperada para a região e áreas das bacias hidrográficas;
- Características geológicas e geotécnicas, relacionadas com a morfologia do terreno como por exemplo: aluvionar ou oneroso, camadas permeáveis ou impermeáveis e tipo de rocha;
- Condicionantes de ocupação do solo, construções (habitações ou construções industriais) ou vias rodoviárias existentes, para as quais pode ser necessário proceder à construção de nós de ligação ou de nós desnivelados;
- Condicionantes paisagísticas e de impacto ambiental, relacionadas com o meio envolvente e com o impacto que a nova via terá na paisagem;
- Condicionantes económicas, relacionadas fundamentalmente com o custo de execução da obra;
- Fatores sociais, relacionados com os benefícios que a nova via poderá trazer para as populações envolventes (nível de serventia), face aos custos da obra.

Nesta fase, é estudado o possível traçado para a via rodoviária à escala de 1:5000/1:10000, onde tipicamente é reservado um corredor de 5 km de largura. Estas disposições gerais serão depois entregues a uma equipa de projeto que levará a cabo a fase seguinte, o estudo prévio.

3.4 Estudo prévio

O estudo prévio não tem como função fornecer os elementos definitivos, nem a pormenorização necessária à execução da obra. O objetivo principal é o de estudar uma ou mais soluções alternativas para o traçado.

É nesta fase que intervêm os estudos de tráfego, geológicos e geotécnicos, paisagísticos e de impacto ambiental.

No estudo prévio são estudados os seguintes aspetos:

- Estudo de tráfego, que irá permitir definir o perfil transversal a adotar, deve ter em consideração os dados disponíveis pela ocupação do solo e tendências de crescimento demográfico nas áreas abrangentes;
- Reconhecimento e levantamento topográfico, onde é feito o levantamento topográfico para futuramente, em gabinete, se estudarem os possíveis traçados. O objetivo é idealizar um esboço para confirmar a viabilidade geométrica da via, sendo reservado um corredor. A largura do corredor pode variar entre 500 m e 1000 m, sendo que em zonas fortemente condicionadas pode tomar valores mais pequenos;
- Escolha do traçado, onde o projetista já dispõe de uma carta atualizada que permite proceder ao estudo do traçado em planta, sendo elaboradas várias hipóteses do traçado em planta e em altimetria;
- Elaboração de estudos geológicos e geotécnicos que permitam avaliar a viabilidade de implantação, estudo de aterros e escavações, assim como a estabilidade de taludes de escavação.

No estudo prévio são elaboradas um conjunto de soluções que se pretendem estudar, tipicamente à escala de 1:2500/1:5000, podendo esta relação variar dependendo do tipo de via a projetar, da morfologia do terreno e respetivas condicionantes naturais ou artificiais.

No final do estudo prévio, do conjunto de soluções estudadas resulta uma definição em alinhamentos retos que permite posteriormente a realização do projeto de execução.

3.5 Projeto de execução

Finalizado e aprovado o estudo prévio, segue-se a fase do projeto de execução. O traçado está aproximadamente definido e o trabalho consiste agora no detalhe do estudo. Sobre a solução de traçado em alinhamentos retos resultante do estudo prévio, é realizada a pormenorização do traçado da via, com o desenvolvimento do traçado em planta em perfil longitudinal.

Nesta fase é realizado um levantamento mais pormenorizado sobre um corredor de 400 m, tipicamente à escala de 1:1000, onde são identificados todos os elementos que possam influenciar o traçado do eixo da via. A definição do traçado deverá obedecer aos critérios estabelecidos nas normas aplicáveis em cada país ou região.

Um projeto de execução de uma estrada envolve várias especialidades de engenharia civil, tais como: traçado, terraplenagens, drenagem, pavimentação, sinalização e segurança, obras de arte, expropriações e obras acessórias.

O traçado geométrico da via é a primeira tarefa a ser realizada, onde se começa por especificar o traçado em planta, com a introdução de curvas compostas. Segue-se o traçado em perfil longitudinal (altimetria), onde são definidas as concordâncias verticais. Por último é especificado o perfil transversal da via.

Após o estudo do traçado da via, desenvolvem-se as restantes especialidades, sendo geralmente os estudos conducentes à seleção dos dispositivos de sinalização a adotar, um dos últimos a ser realizados. Fazem sempre parte do projeto dois tipos de sinalização, uma referente à marcação horizontal e a outra referente à sinalização vertical. Na sinalização vertical existem ainda duas famílias, sendo uma referente à sinalização de código e a outra respeitante à sinalização de orientação, setas direcionais, pórticos e painéis laterais.

O projeto de execução deve conter a pormenorização necessária à implantação da via rodoviária em terreno real.

3.5.1 Traçado em planta

O traçado em planta de uma estrada tem como base de trabalho o levantamento topográfico da área, onde a morfologia do terreno, a presença de outras estradas e as edificações existentes condicionam fortemente o traçado do eixo da via. Também se deve ter em consideração a velocidade de base estabelecida para cada estrada, que obriga a obedecer a parâmetros impostos pelas normas de traçado e que vão influenciar a geometria da estrada.

Tendo em consideração a morfologia do terreno e as respetivas condicionantes, é reservado um corredor, tipicamente de 400 m de largura, a uma escala adequada que permita analisar com pormenor o traçado da via. Sobre a definição do traçado em alinhamentos retos implementam-se curvas compostas, constituídas por arcos de transição (clotóide) e curvas circulares.

Os arcos de transição vulgarmente utilizados no projeto são definidos por curvas de raio variável, designados por clotóide (Walton, 2005). Na figura 3.1, apresenta-se uma representação de uma clotóide.

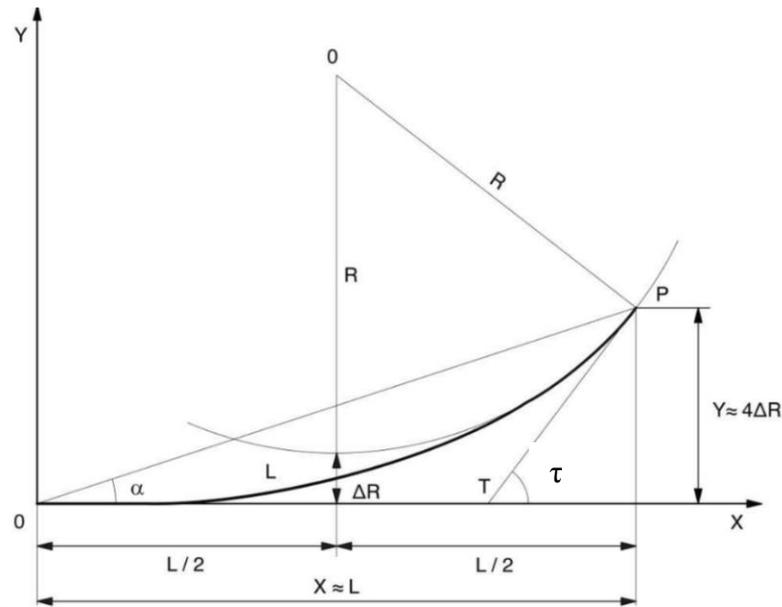


Figura 3.1 Representação da clotóide (InIR, 2010).

As curvas de transição (clotóides) podem ser caracterizadas pelas seguintes relações fundamentais (3.1):

$$L * R = A^2 \tag{3.1}$$

$$\tau = L/2R$$

Onde, L é o desenvolvimento da clotóide (m), R é o raio da curvatura (m), A é o parâmetro da clotóide (m), e τ é o ângulo entre a tangente no final da clotóide e o alinhamento reto (rad).

Quanto maior for o parâmetro A, mais suave (prolongado) é o desenvolvimento da clotóide. A escolha do parâmetro (A) da clotóide deve essencialmente obedecer à condição de implantação (3.2).

$$A \leq R \sqrt{\alpha} \tag{3.2}$$

Onde α é o ângulo de desvio entre os alinhamentos retos, medido em radianos (rad).

As normas de traçado definem o valor mínimo do parâmetro da clotóide em função da velocidade base, como se apresenta na tabela 3.2.

Tabela 3.2 Parâmetro (A) da clotóide (InIR, 2010).

Velocidade base (km/h)	A _{min} (m)
60	96
90	183
120	333

A relação do parâmetro (A) da clotóide entre duas curvas consecutivas deverá obedecer à condição (3.3).

$$2/3 \leq A_1/A_2 \leq 3/2 \quad (3.3)$$

Preferencialmente, os parâmetros das clotoides devem ser iguais. Isto verifica-se tanto para curvas consecutivas no mesmo sentido como em sentido contrário.

No traçado de uma via rodoviária, uma clotóide tem como função fazer a transição gradual da aceleração centrífuga entre o troço reto e a curva circular. Com a introdução de clotoides, providencia-se um aumento e diminuição linear da curvatura, permitindo que o veículo descreva uma trajetória suave. Desta forma, há uma aproximação suave do segmento reto à curva circular e da curva circular ao segmento reto seguinte.

Uma curva composta resulta então da introdução de clotoides antes e depois da curva circular, como se ilustra na figura 3.2.

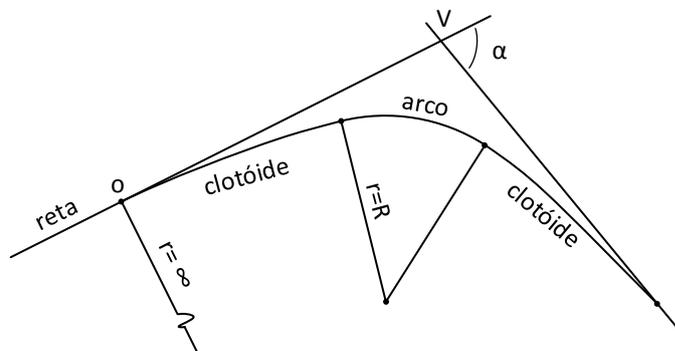


Figura 3.2 Curva composta em planta.

Conhecido ao ângulo (α) designado de desvio dos alinhamentos retos, para traçar o desenvolvimento da curva composta, é necessário determinar o raio (R) do arco da curva circular, o parâmetro (A) das clotoides, a extensão (L) de desenvolvimento das clotoides, os ângulos das tangentes nos pontos finais das clotoides (τ), e os pontos de osculação (O) situados entre os alinhamentos retos e os inícios das clotoides (figura 3.2).

No desenvolvimento do traçado em planta várias abordagens podem ser adotadas para calcular os parâmetros das curvas compostas. Um dos critérios consiste em fixar o valor do parâmetro (A) da clotóide para valores típicos e a partir deste retirar os restantes elementos da curva composta, raio (R) da curva composta e extensão (L) da clotóide. Alternativamente, fixa-se o raio (R) da curva circular, a extensão (L) da clotóide e a partir destes retira-se o parâmetro (A) da clotóide.

A definição do traçado em planta deve ter como base os critérios definidos nas normas de traçado (InIR, 2010). Nestas normas estão estabelecidos os critérios para cada tipo de estrada a projetar, como por exemplo: velocidade de base, largura das vias, raios mínimos a implementar em planta e em perfil, entre outros.

Existe um conjunto de fatores de análise por parte dos condutores relativamente ao trajeto que vão descrever na via, como por exemplo: conhecimento prévio, existência de interseções e acessos, curvatura, distância de visibilidade, perfil longitudinal, largura da faixa de rodagem, intensidade de tráfego e condução no intradorso ou extradorso da via. Os troços em linha reta por um lado facilitam as ultrapassagens (Jacob, 2006), devendo estes ter uma extensão mínima (em metros) de seis vezes a velocidade base (em km/h). Isto equivale a garantir que à velocidade base um troço reto demora pelo menos 21.6 segundos a ser percorrido.

No entanto, os troços retos podem provocar monotonia, encadeamento, dificuldade de avaliação de velocidade e distância de segurança principalmente à noite, assim estes devem ter uma extensão máxima (em metros) de vinte vezes a velocidade base (em km/h). Na tabela 3.3 apresentam-se os valores indicativos das extensões mínimas e máximas dos troços retos, para diferentes velocidades de projeto.

Tabela 3.3 Extensão das retas em função da velocidade de base (InIR, 2010).

Extensão das retas (m)	Velocidade base (km/h)		
	60	90	120
$L_{\min} (6*V_b)$	360	540	720
$L_{\max} (20*V_b)$	1200	1800	2400

As normas de traçado definem valores a usar para o raio em função da velocidade de base. Estão caracterizados dois tipos de raios, raio normal e raio absoluto. O raio normal corresponde ao valor do raio mínimo que tipicamente é usado, embora nada impeça que o valor do raio seja superior. O raio absoluto é o valor de raio mínimo admissível para a velocidade de base da via em análise e deve ser evitado.

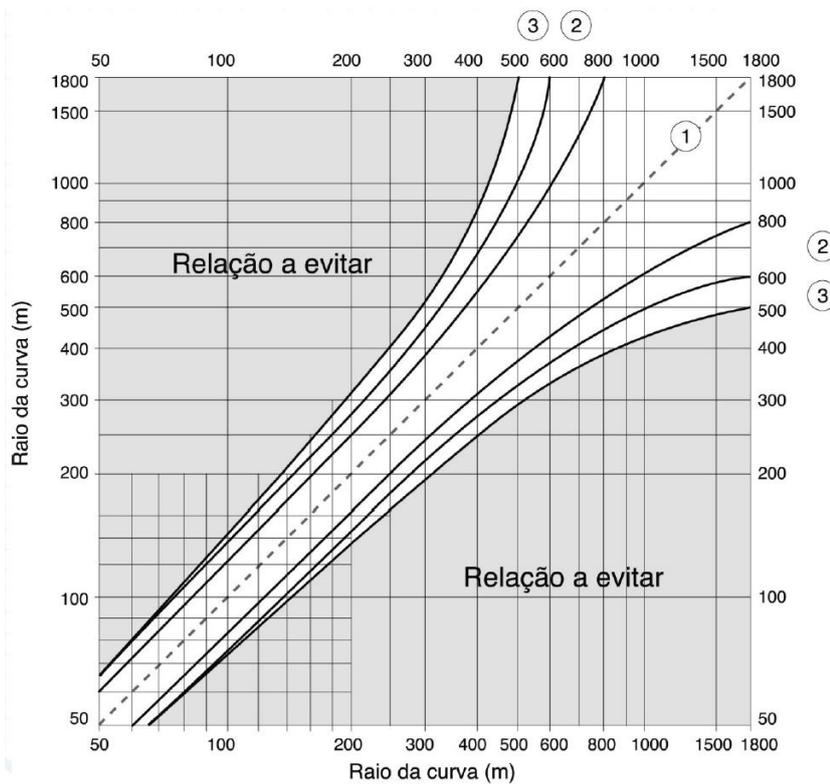
Na tabela 3.4 apresentam-se os valores de Raio Normal e Raio absoluto a implementar numa via em função da velocidade base.

Tabela 3.4 Raios das curvas circulares em planta (InIR, 2010).

Velocidade Base (km/h)	Raio mínimo absoluto (RA) (m)	Raio mínimo normal (RN) (m)
60	130	250
90	320	550
120	700	1000

Quando os valores de raio são abaixo do valor de raio absoluto, na implantação da via terão que ser tomadas medidas adicionais, como a colocação de sinalização de aviso de acordo com a curva descrita.

Numa sucessão de curvas, o valor de variação do raio, não deve ser superior a duas vezes e meia (boa prática). Na figura 3.3, apresenta-se a relação admissível de raios numa sucessão de curvas.



1 - Relação muito boa; 2 - Relação boa; 3 - Relação aceitável

Figura 3.3 Combinação desejável de raios do traçado em planta (InIR, 2010).

Como referido anteriormente, uma curva composta é tipicamente constituída por uma parte em arco de circunferência entre duas clotoides. As curvas de transição visam assegurar os seguintes aspetos: condição de segurança, comodidade dinâmica para o condutor, variação gradual da força centrífuga entre a reta e a curva circular, disfarce de sobrelevação, critérios estético e ótico.

3.5.2 Perfil longitudinal

Após a definição do traçado em planta, estuda-se o traçado da estrada em altimetria, o qual é designado por rasante. A rasante é condicionada geralmente pelo perfil longitudinal do terreno natural. Um dos objetivos nesta fase é posicionar a via o mais próximo possível do terreno natural, de forma a minimizar os volumes de escavações e aterros e consequentemente os custos da obra.

Tendo em conta o perfil longitudinal do terreno segundo a diretriz, traça-se a designada rasante, a qual é constituída por trainéis, segmentos retos do perfil longitudinal, em rampa ou declive (ascendente ou descendente) e concordâncias verticais.

As concordâncias verticais podem ser de dois tipos, côncava ou convexa (cavidade ou lomba) e permitem fazer uma transição gradual e suave entre trainéis de inclinação diferentes. Numa concordância convexa, considera-se que o raio é positivo (+R) e numa concordância côncava, considera-se que o raio é negativo (-R), como se ilustra na figura 3.4.

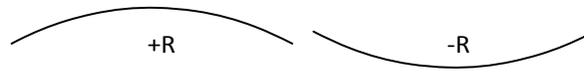


Figura 3.4 Sinal da concordância.

As concordâncias verticais são definidas por equações do 2º grau, cujos parâmetros são geralmente o raio mínimo e o desenvolvimento, sendo necessário conhecer as inclinações dos trainéis associados a essa concordância, trainel de entrada e de saída.

A definição do traçado em perfil longitudinal também tem como base os critérios definidos nas normas de traçado. Estas definem as inclinações máximas e mínimas, assim como os raios mínimos das concordâncias verticais a implementar entre os trainéis.

Na figura 3.5, a cor vermelho, pode ver-se um exemplo do perfil longitudinal da estrada, e a cor verde, o perfil natural do terreno.

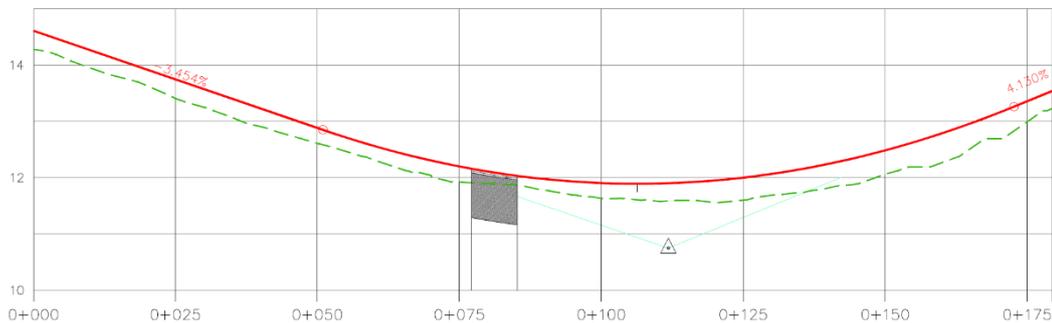


Figura 3.5 Perfil longitudinal.

Quando a inclinação do trainel tem sentido ascendente, considera-se que a inclinação é positiva (+i) e quando a inclinação do trainel é descendente considera-se que a inclinação é negativa (-i), como se ilustra na figura 3.6.

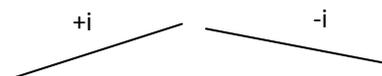


Figura 3.6 Sinal do trainel.

Os trainéis em perfil longitudinal devem ter em conta a inclinação máxima em função da velocidade base de projeto da via, conforme se define nas normas de traçado (tabela 3.5).

Tabela 3.5 Inclinação máxima dos trainéis (InIR, 2010).

Velocidade Base (km/h)	Inclinação máxima (%)
60	7
100	5
120	3

Como se constata pela tabela 3.5, no caso de uma autoestrada concebida para uma velocidade de base de 120 km/h, a inclinação máxima dos trainéis não deve exceder os 3%. Por outro lado, para uma boa drenagem, o trainel deverá ter uma inclinação mínima de 0.5%.

Nos casos em que a inclinação seja superior ao determinado nas normas de traçado, terão que ser tomadas medidas adicionais de segurança, como por exemplo: vias adicionais, rampas de escapatória, entre outras.

Para determinar as características mínimas de uma concordância vertical deve atender-se aos seguintes critérios: segurança de circulação, comodidade de circulação, comodidade ótica e estético. Os dois primeiros parâmetros são garantidos recorrendo a raios de concordância suficientemente grandes, os dois últimos são garantidos estabelecendo desenvolvimentos mínimos (França, 2011).

As normas de traçado definem os valores de raio mínimo de concordância convexa e de concordância côncava (tabela 3.6).

Tabela 3.6 Raios das concordâncias em perfil longitudinal (InIR, 2010).

Velocidade base (km/h)	Raio da condordância (m)		Desenvolvimento (m)
	Côncava	Convexa	Côncava/Convexa
60	1600	3000	120
90	4500	8500	120
120	7000	16000	120

O raio mínimo estabelecido nas normas de traçado para as concordâncias côncavas é geralmente menor, comparado com o raio convexo, devido às suas caraterísticas geométricas que asseguram à partida uma maior comodidade e segurança.

O desenvolvimento mínimo das concordâncias tem como principal objetivo assegurar o conforto ótico dos condutores

No cálculo do perfil longitudinal, pode-se optar por fixar o valor do raio (R_c) da concordância vertical e a partir deste, retirar os restantes elementos, como o seu desenvolvimento (D). Uma alternativa será fazer coincidir o desenvolvimento da concordância vertical (D) com o desenvolvimento da curva composta ($d_{\text{arco}} + 2 * L_{\text{colotóide}}$) e a partir deste retirar o raio (R_c) da concordância.

3.5.3 Perfil transversal

A escolha do perfil transversal está associada quer à velocidade de base adotada para a estrada quer ao tipo de estrada que se pretende construir.

Na descrição do perfil transversal encontra-se informação necessária para a implantação da estrada, tal como as larguras das vias e das bermas, as camadas do pavimento, a inclinação dos taludes de escavação e aterro, características das valetas, concordâncias de aterro, inclinações transversais, entre outras.

Geralmente, a plataforma para estradas nacionais de duas vias é composta por uma faixa de rodagem e bermas. Em ambiente urbano, a plataforma poderá ser complementada com passeios para peões em detrimento das bermas. Em autoestradas a plataforma é constituída por duas faixas de rodagem e um separador central com largura a especificar consoante os casos.

Estes últimos elementos de traçado permitem definir com pormenor, à escala 1/200, cortes transversais com equidistância geralmente de 25 em 25 m ao longo da diretriz da via. Estes perfis transversais são desenhados após o estudo da diretriz e respetiva rasante. É também com estes perfis transversais que se identificam zonas mais críticas de traçado, como por exemplo, estabilidade de taludes, ou zonas onde sejam necessários muros, entre outros condicionalismos.

A plataforma das estradas, em reta, apresenta-se com uma inclinação transversal a duas águas, para garantir o correto escoamento das águas pluviais.

Em curva adota-se uma inclinação única, designada sobrelevação. A sobrelevação é utilizada para diminuir a incomodidade e o risco de derrapagem para o exterior (por excesso de velocidade) e para continuar a assegurar a drenagem das águas pluviais. Em Portugal, a especificação da sobrelevação segue geralmente uma regra exposta nas normas de traçado, em que se refere que no início da curva de transição a inclinação transversal da estrada deve ser a uma água e inclinada a 2.5% para o intradorso da curva, ou seja, para o lado interior da curva. No fim da curva de transição ou início da curva circular a inclinação deverá ser de valor Se (%) para o intradorso da curva.

O valor de Se (%) é definido segundo o raio da curva circular e pode apresentar o valor máximo de 7%, de forma a diminuir o risco de derrapagem para o interior da curva em condições de má aderência e velocidades reduzidas (InIR, 2010).

A rotação para processar as variações ao longo da curva de transição é feita tendo como referência o eixo da estrada, para as estradas de uma faixa de rodagem e duas vias, como se ilustra na figura 3.7.

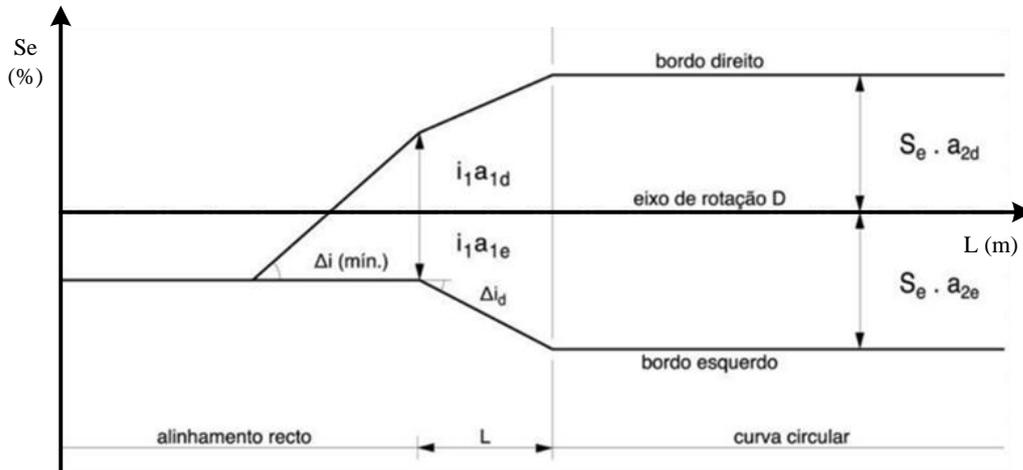


Figura 3.7 Representação esquemática da sobrelevação (InIR, 2010).

3.5.4 Taludes

Um talude é a superfície de terreno que se localiza junto a estrada e pode ser de origem natural ou artificial. Os taludes artificiais são criados durante da construção da estrada e identificam-se como resultantes de escavação ou aterro no terreno.

As inclinações dos taludes de escavação e de aterro são definidas em função de resultados dos estudos geológico-geotécnicos e têm como função garantir a estabilidade natural do terreno.

Regra geral, os taludes de escavação e de aterro apresentam uma relação de 1:1.5 (V/H), para que a estabilidade do terreno esteja garantida.

Na figura 3.8, ilustra-se o projeto de um perfil transversal típico, composto por um aterro do lado esquerdo e uma escavação do lado direito

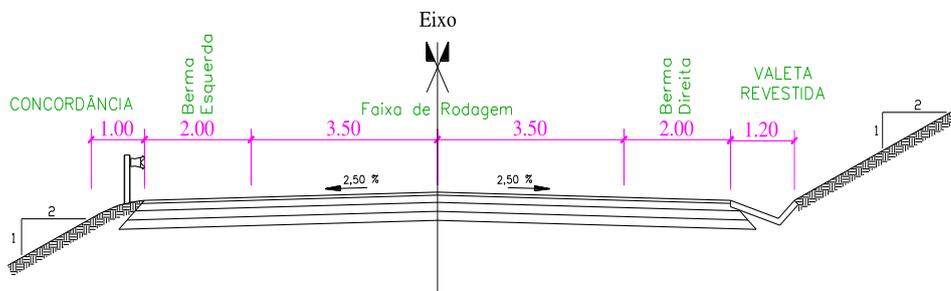


Figura 3.8 Perfil transversal típico.

Nos casos de terreno pouco estável a relação é de 1:2, em ambos os tipos de taludes, escavação e aterro. Do lado esquerdo representa-se ainda a concordância de aterro, que

é a superfície de terreno que faz a transição entre a berma e o talude; do lado direito representa-se a valeta, que serve para efetuar o escoamento longitudinal das águas pluviais.

3.5.5 Sinalização

Uma das últimas tarefas a realizar num projeto de vias de comunicação é a execução do projeto de sinalização e segurança, onde se implementa a tradicional sinalização horizontal (marcas rodoviárias) e a sinalização vertical (sinais de trânsito). Nesta fase são também definidos os locais a dotar com guardas de segurança, atenuadores de impacto, ou outros dispositivos que propiciem uma circulação mais segura (Rodrigues, 2008; Roque, 2005). A sinalização horizontal é pintada no pavimento da via normalmente com material refletor. A sinalização vertical é colocada junto a berma e pode ser do tipo informativa, de obrigatoriedade ou de proibição.

Na figura 3.9, ilustra-se um cruzamento com a sinalização horizontal e vertical que é utilizada normalmente.

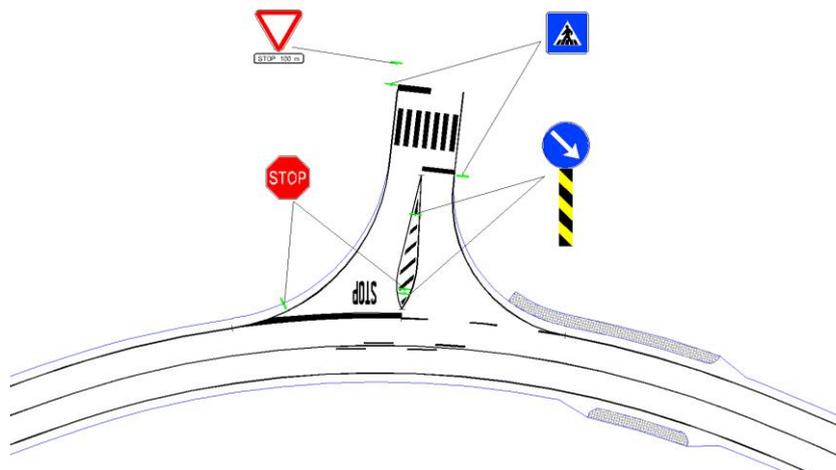


Figura 3.9 Sinalização de um cruzamento.

Com a sinalização horizontal, ou seja, a marcação no pavimento com pintura geralmente branca e refletora, pretende-se guiar e orientar o tráfego, assim como, alertar para situações de proibição de ultrapassagem. Fazem parte da sinalização horizontal a marcação longitudinal e a marcação transversal.

A sinalização longitudinal, inclui normalmente as guias laterais e de separação de vias de sentidos (linha axial). A linha axial pode ser do tipo contínua, descontínua ou mista.

As marcas transversais podem ser, por exemplo, barras de paragem relacionadas com um sinal de STOP ou uma passadeira para peões.

Os critérios da colocação da sinalização horizontal são definidos pela norma de marcas rodoviárias e pelo Regulamento de Sinalização do Trânsito (InIR, 2015a; RST, 2011).

A sinalização vertical é constituída por sinais de código (informativos, de perigo, de obrigação) e são geralmente colocados junto às bermas das estradas de forma visível mas sem prejudicar o tráfego.

Os critérios para a colocação da sinalização vertical, assim como o dimensionamento dos sinais são definidos pelas normas de sinalização vertical e pelo Regulamento de Sinalização do Trânsito (InIR, 2015b; RST, 2011).

3.6 Sinuosidade de traçados

A sinuosidade ou tortuosidade de um traçado é uma definição igualmente utilizada na classificação de rios, e relaciona o desvio do trajeto em linha reta com o percurso atual do rio ou da estrada (Mueller, 1968).

A perceção de sinuosidade, alta ou baixa, depende do desenvolvimento da curva e da velocidade do objeto que se desloca através dela. A sinuosidade de uma mesma linha curva pode ser considerada alta para uma autoestrada, mas baixa para uma estrada de montanha. Na figura 3.10, é possível ver uma estrada de montanha com grande sinuosidade.



Figura 3.10 Estrada de montanha sinuosa.

Como se pode ver na imagem da figura 3.10, o traçado atual da estrada é significativamente mais extenso, por este seguir o perfil da colina, comparativamente a uma trajetória imaginária em linha reta.

Nesta secção são apresentadas métricas de avaliação de sinuosidade de traçados de estradas: índice de sinuosidade (IS), índice de curvatura (IC) e índice de curva (I_{curva}). Adicionalmente, é feita uma análise de sinuosidade no domínio da curvatura, segundo a transformada discreta de Fourier.

Para se obterem valores de referência destes indicadores, de forma a permitir a futura validação de traçados gerados procedimentalmente, foram estudados trechos dos traçados da autoestrada A25 e da estrada nacional N105.

3.6.1 Índice de sinuosidade

O índice de sinuosidade mede a relação entre um dado percurso atual e uma trajetória em linha reta (Mueller, 1968; ArcGis, 2011; IMT, 2014).

Para percursos em linha reta, este índice de sinuosidade toma o valor de 1. Para trajetórias de rios ou de estradas, o índice de sinuosidade assume valores superiores a 1. Na tabela 3.7, apresentam-se as classes convencionais de índices de sinuosidade para rios.

Tabela 3.7 Índices de sinuosidade para rios (Mueller, 1968).

Índice de sinuosidade	Designação
$IS < 1.05$	Maioritariamente em reta (<i>almost straight</i>)
$1.05 \leq IS < 1.25$	Ondulado (<i>winding</i>)
$1.25 \leq IS < 1.5$	Sinuoso (<i>twisty</i>)
$IS \geq 1.5$	Enroscado (<i>meandering</i>)

O índice de sinuosidade (IS) é calculado pela relação entre a extensão atual da estrada e a extensão mais curta seguindo em linha reta (3.4).

$$IS = L_{atual} / L_{reta} \tag{3.4}$$

Onde, L_{atual} corresponde à distância percorrida ao longo do traçado da via e L_{reta} corresponde à distância em linha reta entre dois pontos, como se observa na figura 3.11.

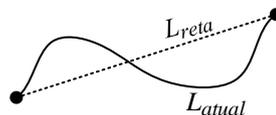


Figura 3.11 Estrada sinuosa.

Foram calculados os índices de sinuosidade para traçados reais do tipo autoestrada (A25) e do tipo estrada nacional (N105), obtendo os valores que se apresentam na tabela 3.8.

Tabela 3.8 Índice de sinuosidade para traçados de estradas reais.

	Estrada nacional	Autoestrada
IS	1.17	1.11

Como se pode ver pela tabela 3.8, um traçado do tipo autoestrada tende a ser menos sinuoso comparativamente com um traçado de estrada nacional. Os valores do índice de sinuosidade calculados para os traçados reais localizados no litoral norte de Portugal, enquadram-se nos valores médios publicados em (IMT, 2014) para esta região (1.0 – 1.20).

3.6.2 Índice de curvatura

A curvatura é uma medida da taxa de variação da direção da tangente a uma curva ao longo do seu percurso (Jia, 2014).

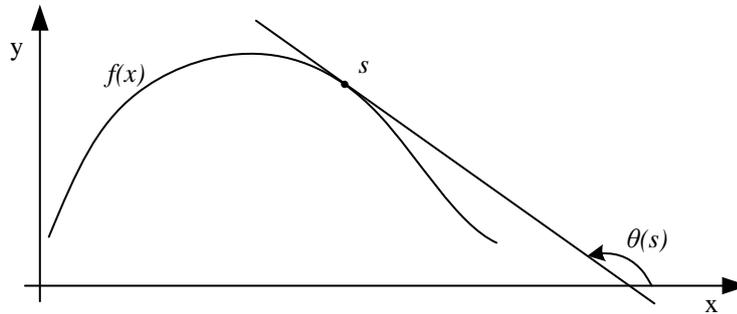


Figura 3.12 Tangente ao arco no ponto S (Jia,2014).

A curvatura (C) de uma curva definida pela função $f(x)$, num ponto S (figura 3.12), pode ser calculada pela equação (3.5).

$$C = d\theta/ds \quad (3.5)$$

Onde θ é o ângulo formado pela tangente ao arco no ponto S e o eixo x .

No plano horizontal, curvas com um desenvolvimento para a esquerda têm uma curvatura positiva e curvas que se desenvolvem para a direita têm uma curvatura negativa.

O valor de curvatura em qualquer ponto de um arco de circunferência (Raio = const.) pode ser calculado pelo inverso do raio ($C=1/\text{Raio}$).

A curvatura de uma curva de uma estrada vai afetar a velocidade com que os veículos podem viajar sem derraparem. A curvatura de um traçado rodoviário pode ser representada com se ilustra na figura 3.13.

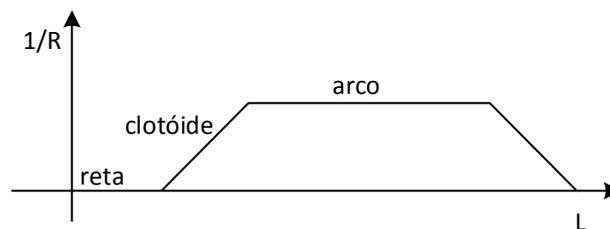


Figura 3.13 Curvatura de um traçado.

Como se pode ver pelo gráfico da figura 3.13, o raio em reta tem um valor constante (infinito), sendo o seu inverso igual a zero. Durante a descrição da clotóide o inverso do raio tem uma variação linear. Durante o desenvolvimento do arco, o inverso do raio tem um valor constante ($R = \text{const.}$).

A curvatura total (CT) de um arco de uma curva circular mede a variação total do vetor tangente (Milnor, 1950). Para a mesma extensão de desenvolvimento, curvas que se desenrolam lentamente, quase linhas retas, tem um valor de curvatura total pequeno. A curvatura total de uma curva no plano horizontal é calculada pelo integral da curvatura ao longo do seu percurso (3.6)

$$CT = \int C(s) ds, C(s) = 1/R(s) \quad (3.6)$$

A curvatura total de uma curva fechada é sempre um número inteiro múltiplo de 2π . O ângulo descrito ($d\theta$) num percurso infinitesimal (ds) sobre uma curva depende do raio (R) de osculação (3.7).

$$d\theta = ds/R \equiv ds = R * d\theta \quad (3.7)$$

Juntando as e equações 3.6 e 3.7, obtém-se a expressão que permite calcular o valor de curvatura total (3.8).

$$CT = \int 1/R * R * d\theta \equiv CT = \int d\theta \quad (3.8)$$

No caso de um traçado rodoviário definido por uma sequência de segmentos retos, a curvatura total (CT) pode ser calculada através da acumulação de todos os ângulos (θ) de desvio entre os segmentos retos ao longo da estrada (3.9).

$$CT = \sum |\Delta\theta| \quad (3.9)$$

Para permitir a obtenção de um indicador independente da extensão (L) da estrada analisada, é possível definir o índice de curvatura (IC), como sendo a curvatura média por unidade de percurso (3.10).

$$IC = CT/L \quad (3.10)$$

Para calcular o índice de curvatura, é necessário acumular todos os desvios de orientação ao longo do traçado. Foram calculados os índices de curvatura (equação 3.10) para o traçado da autoestrada (A25) e para o traçado da estrada nacional (N105), obtendo-se os valores apresentados na tabela 3.9.

Tabela 3.9 Índice de curvatura para traçados de estradas reais.

	Estrada nacional	Autoestrada
IC	5406.76	853.78

Como se pode ver pelos dados apresentados na tabela 3.9, a estrada nacional apresenta um índice de curvatura (IC) significativamente superior, comparativamente com a autoestrada. Esta diferença é devida às características geométricas do traçado, permitidas pelas normas para estradas desta tipologia.

3.6.3 Índice de curva

O índice de curva é um indicador útil para analisar a sinuosidade de um traçado rodoviário. O índice de curva relaciona a extensão em curva de um traçado com a extensão total da estrada (3.11).

$$I_{curva} = L_{curva}/L_{total} \quad (3.11)$$

Na tabela 3.10, apresentam-se os valores de índice de curva obtidos para traçados reais do tipo autoestrada e estrada nacional.

Tabela 3.10 Índice de curva para traçados de estradas reais.

	Estrada nacional	Autoestrada
I_{curva}	0.47	0.77

Como se pode ver pelos dados da tabela, para os traçados analisados, uma estrada do tipo autoestrada tem um índice de curva superior quando comparado com um traçado do tipo estrada nacional.

Estes resultados comprovam as boas práticas de projeto de estradas que indicam que um traçado do tipo autoestrada tende a ser maioritariamente descrito em curva.

3.6.4 Análise no domínio da curvatura

A transformada discreta de Fourier (*Discrete Fourier Transform, DFT*) é amplamente usada em diferentes áreas científicas, como engenharia, ciências e matemática (Aldrian, 2008; Ietsugu, 2008).

A DFT, quando aplicada a um conjunto de amostras no domínio dos tempos, resulta num conjunto de funções sinusoidais no domínio das frequências (Mitra, 2001). Quando aplicada a um conjunto de amostras de curvas sinusoidais no domínio do metro (m), resulta num conjunto de funções sinusoidais no domínio da curvatura (m^{-1}).

A transformada discreta de Fourier permite analisar a sinuosidade de uma estrada pela sua decomposição numa série de traçados sinusoidais (3.12).

$$X(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \left(e^{-\frac{jk2\pi k}{N}} \right) , k = 0 \dots N - 1 \quad (3.12)$$

Para efetuar a análise no domínio da curvatura para traçados de estradas recorrendo à DFT, começa-se por obter uma representação do eixo da via pela sua orientação (θ). À representação do eixo da via pela sua orientação (em radianos) é aplicada a função seno, obtendo-se uma representação do traçado pelo seno de teta (em metros), em cada ponto amostrado.

Os traçados analisados foram amostrados com uma frequência de uma amostra por metro ($f_s = 1 \text{ m}^{-1}$), correspondendo a um período de amostragem de 1 metro ($T_s = 1 \text{ m}$). Como exemplo teórico, foi aplicada uma análise no domínio da curvatura a uma estrada em curva circular com 500 m de raio. Na figura 3.14, apresenta-se o traçado desta estrada e a sua orientação ao longo do trajeto descrito.

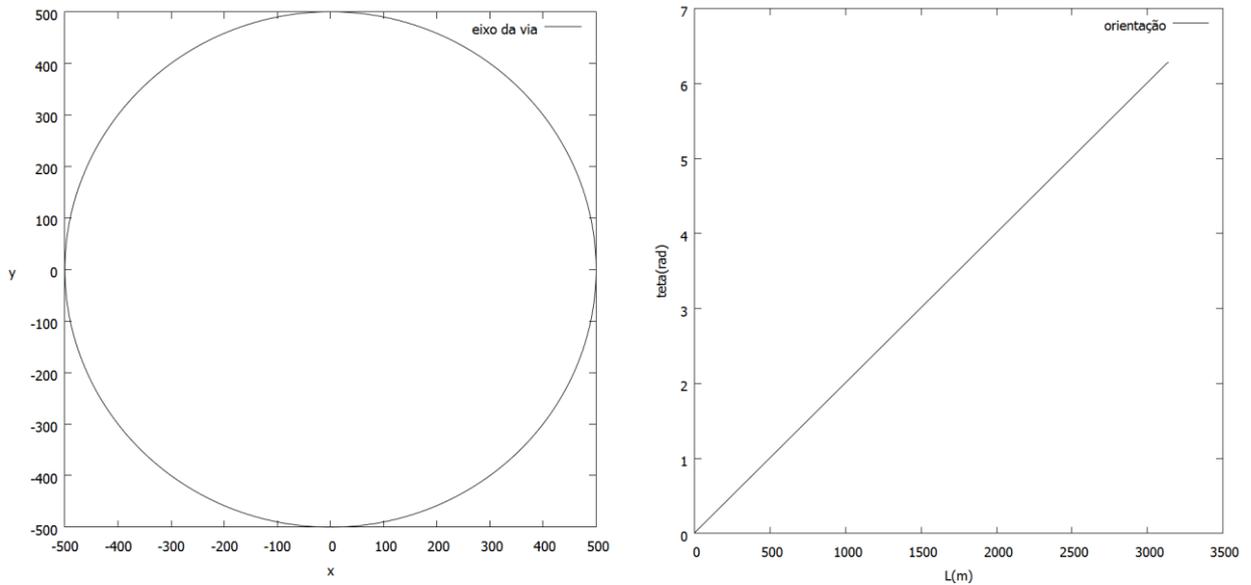


Figura 3.14 Representações do eixo da via (plano e orientação).

Na figura 3.15, apresenta-se o seno da orientação (θ) para cada ponto da amostra.

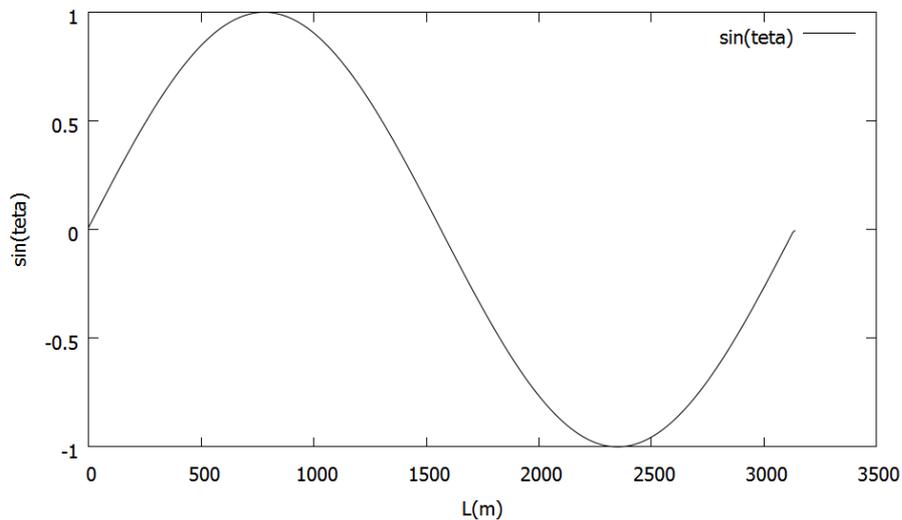


Figura 3.15 Representação do eixo da via pelo seno do azimute.

Como é conhecido, quando aplicada a transformada discreta de Fourier a uma função sinusoidal pura, resulta um impulso de *Dirac*, no domínio das frequências. A frequência a que ocorre o impulso de *Dirac* corresponde ao inverso do período ($1/T$) do sinal de

entrada. Na figura 3.16, apresenta-se a transformada discreta de Fourier da função seno da orientação do eixo da via ($\sin(\theta)$), do exemplo anterior.

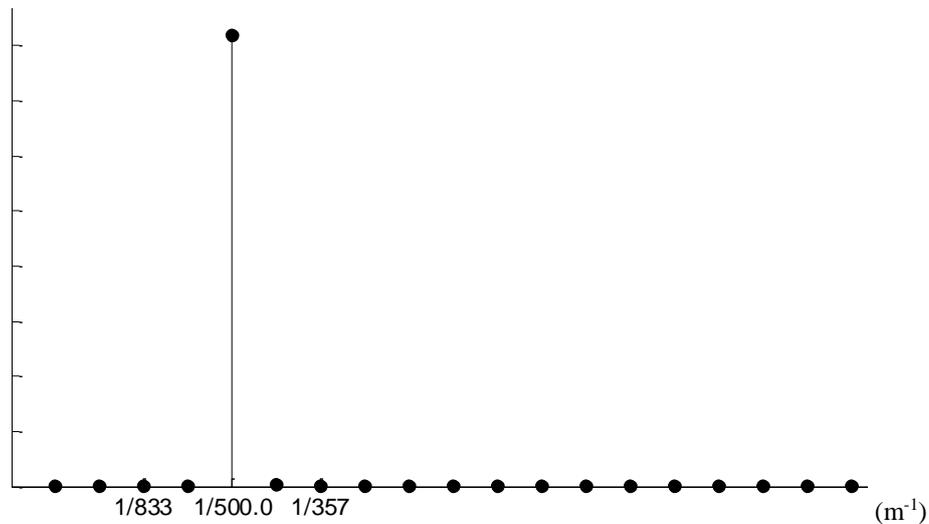


Figura 3.16 DFT para o traçado exemplo.

Como se pode ver por este gráfico, existe apenas um elemento com amplitude diferente de zero, correspondente à curvatura de $1/500 m^{-1}$. Este elemento é relativo a uma curva com raio de 500 m descrita pelo trajeto da estrada analisado, como era esperado.

Na figura 3.17, apresenta-se a análise no domínio da curvatura correspondente à estrada nacional N105.

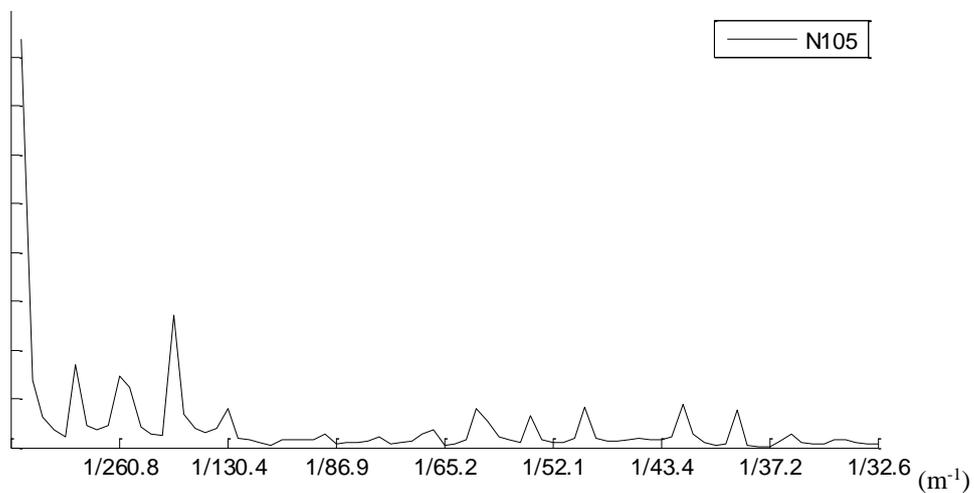


Figura 3.17 DFT para o traçado da estrada nacional N105.

Para o traçado da estrada nacional a transformada discreta de Fourier, aponta para amplitudes que têm significado entre a curvatura de $1/65.2 m^{-1}$ e sensivelmente a curvatura de $1/37.2 m^{-1}$, e entre a curvatura de $1/260 m^{-1}$ e a curvatura de $1/130 m^{-1}$. Este resultado confirma a tendência espectral de utilização de curvas com raios na gama de 40 m a 160 m, sendo mais predominante a utilização de raios da ordem dos 160m.

Na figura 3.18, apresenta-se a análise no domínio da curvatura para um troço da autoestrada A25.

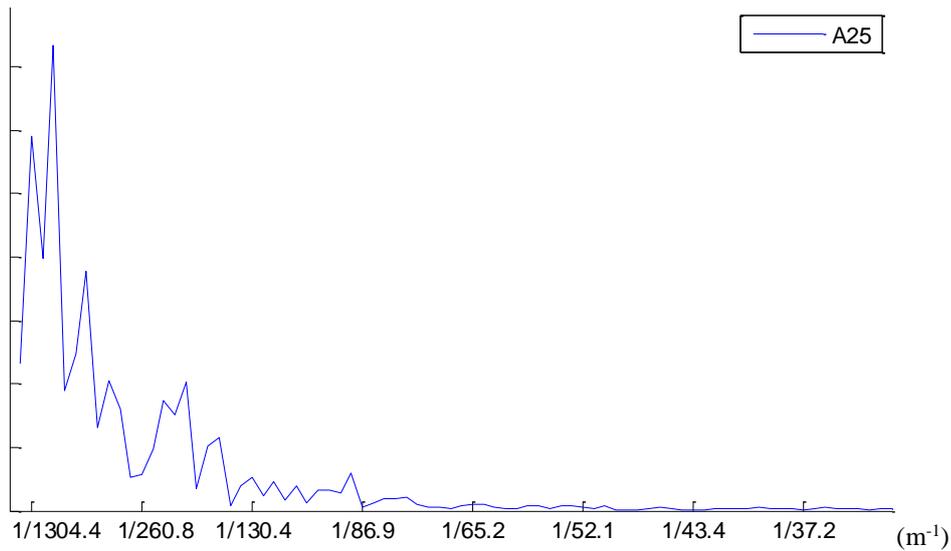


Figura 3.18 DFT para o traçado da autoestrada A25.

Como se pode ver pelo gráfico da figura 3.18, para traçados do tipo autoestrada, as amplitudes dos harmónicos, tem especial significado para a curvatura de $1/1304.4 \text{ m}^{-1}$ e apresentam uma quebra significativa a partir sensivelmente da curvatura $1/260.8 \text{ m}^{-1}$.

Na figura 3.20, apresentam-se em simultâneo as transformadas de Fourier para o traçado da autoestrada e para o traçado da estrada nacional.

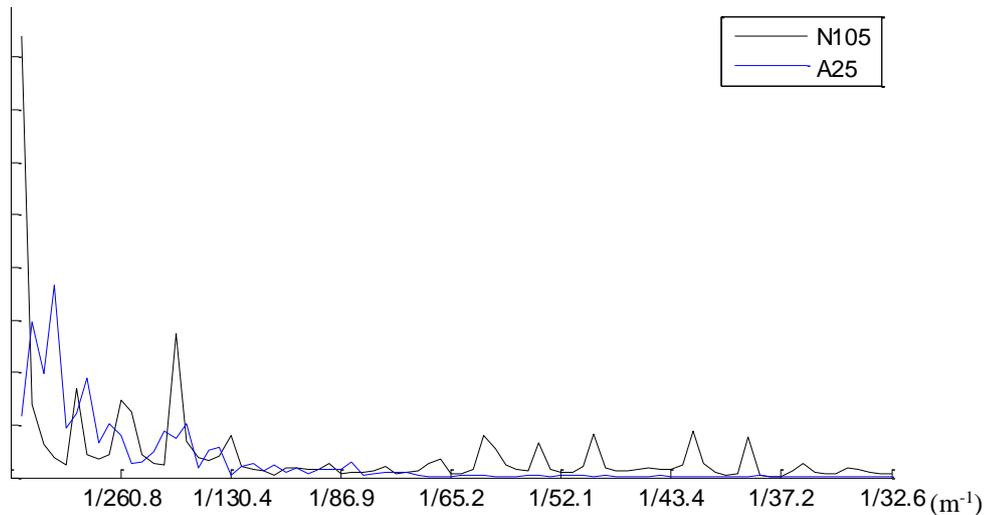


Figura 3.19 DFT para os traçados da autoestrada e estrada nacional.

Comparando os resultados obtidos para o traçado do tipo autoestrada (azul) e a para o traçado do tipo estrada nacional (preto) da figura 3.19, verifica-se que as amplitudes das componentes com curvaturas entre $1/260.8 \text{ m}^{-1}$ e $1/37.2 \text{ m}^{-1}$ são mais significativas para a estrada nacional, evidenciando uma predominância de curvas com raios mais pequenos relativamente à autoestrada.

Para a autoestrada, a predominância de curvaturas entre $1/1304.4 \text{ m}^{-1}$ e $1/260.8 \text{ m}^{-1}$, confirma a tendência espectável de utilização mais frequente de curvas com raios na gama de 420 m a 1300 m.

Os índices apresentados nesta secção permitem analisar a sinuosidade de traçados rodoviários. Diversos fatores geométricos podem fazer variar a sinuosidade de um traçado rodoviário, como por exemplo:

- Ângulos de desvio dos alinhamentos;
- Raios de curvatura;
- Desenvolvimentos das curvas;
- Relações entre as extensões em curva e as extensões em reta.

O índice de sinuosidade (IS), em função da extensão da estrada, permite obter uma perceção da sinuosidade do traçado e se a trajetória se afasta muito ou pouco da ligação em linha reta.

O índice de curvatura (IC) permite aferir se o traçado possui muitos desvios de direção, dando a indicação sobre a existência de curvas muito ou pouco acentuadas.

O índice de curva (I_{curva}) permite avaliar que percentagem do traçado é descrita em curva e em reta.

Pelos resultados apresentados da transformada discreta de Fourier quando aplicada a traçados reais de diferentes tipos, conclui-se que esta é útil para avaliar a sinuosidade de um traçado rodoviário. A transformada discreta de Fourier também permite analisar qual a predominância de curvaturas num determinado traçado.

Os indicadores estudados nesta secção serão uteis para a avaliação dos traçados gerados procedimentalmente.

Sumário

Neste capítulo foram apresentados os conceitos associados à conceção e projeto de redes rodoviárias em engenharia de vias de comunicação. Foram apresentadas e descritas as diferentes fase de projeto de uma estrada, instituídas em vias de comunicação. Por último foram apresentados os indicadores estudados para análise de sinuosidade de traçados. Estes indicadores foram utilizados na análise de traçados reais, onde foram apresentados os resultados obtidos. Estes indicadores serão utilizados no âmbito desta tese, na análise de sinuosidade de traçados produzidos procedimentalmente (secção 8.1).

Modelação de Ambientes Virtuais

As aplicações de simulação em tempo real requerem, geralmente, a prévia modelação dos ambientes virtuais utilizados. A modelação de ambientes virtuais coloca enormes desafios, não só pela qualidade requerida dos modelos gerados, mas também pela quantidade de inúmeros objetos que é necessário criar e manipular.

A modelação de ambientes rodoviários envolve a definição de diferentes elementos, como terreno, nós de ligação, redes de estradas, traçados de estradas, sinalização, entre outros. Como referido em (Smelik, 2014), tem-se assistido a um crescimento de abordagens específicas para a modelação individual de elementos de um ambiente, como terrenos, estradas, edifícios, entre outros. Não é conhecida nenhuma abordagem de preparação de ambientes rodoviários para simulação de condução que integre num único processo todas as etapas requeridas, desde os nós de ligação, rede rodoviária, traçados das estradas até à geração dos modelos geométricos e semântico.

Neste capítulo são apresentados e discutidos os trabalhos mais relevantes na área da modelação procedimental de ambientes rodoviários para aplicações de simulação em tempo real. São também referidos os trabalhos mais relevantes realizados na geração automática de redes rodoviárias e na geração de traçados rodoviários.

Por último são referidos os trabalhos relevantes que focam a necessidade de criação de uma descrição semântica conjuntamente com a criação do modelo visual de um ambiente. Esta descrição é fundamental em simulação de condução, para a colocação de atores, parametrização de eventos de tráfego e produção de relatórios relativos ao ensaio experimental realizado.

4.1 Modelação de ambientes

Uma proposta para a modelação procedimental de um ambiente virtual e adequado para simulação em tempo real é apresentada por Smelik et al. em 2008 (Smelik, 2008). O autor descreve um processo em que o ambiente virtual é criado de forma hierárquica em camadas, a partir de um esboço inicial, incluindo o tratamento da rede rodoviária (figura 4.1).

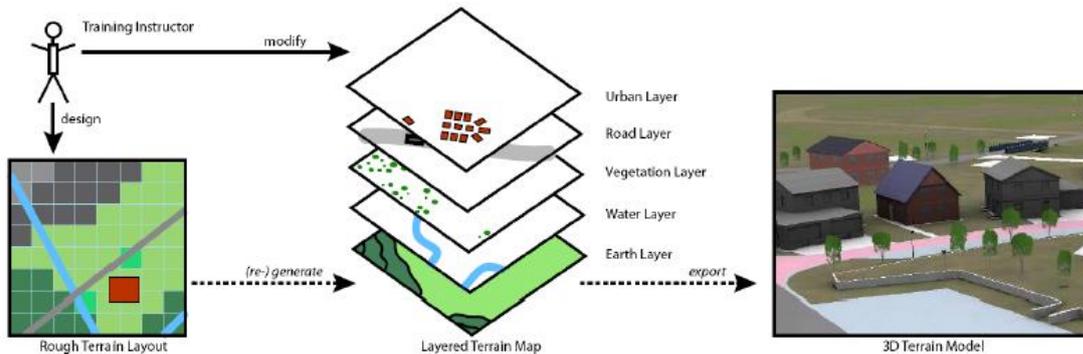


Figura 4.1 Geração do modelo visual em camadas (Smelik, 2008).

Na base do modelo hierárquico encontra-se a definição do modelo do terreno, seguindo-se o modelo hidrográfico, o modelo da vegetação, o mapa rodoviário e por último o modelo dos edifícios e outros elementos urbanos. Uma vantagem desta hierarquização é que cada camada pode ser tratada individualmente. No processo de geração do modelo final é tida em consideração a adequação do modelo de terreno às restantes instanciações de objetos 3D, como abordado em (Latham, 2006). No entanto, na proposta apresentada por Smelik et al. não é muito perceptível qual a metodologia utilizada para geração do traçado rodoviário.

Smelik et al. em 2011 apresentam uma abordagem de modelação de um ambiente virtual, recorrendo a um modelador interativo (Smelik, 2011). A geração do ambiente virtual utilizando um modelador interativo obriga a um controlo demasiado elevado por parte do utilizador, fazendo com que o processo deixe de ser totalmente automático. Para a geração do modelo geométrico rodoviário são exploradas as técnicas de modelação procedimental de redes urbanas apresentadas por Kelly et al. em 2008, onde a criação destas redes tem por base modelos pré-definidos (grelha, radial, etc.) (Kelly, 2008).

Em (Thomas, 2000) é possível encontrar um ambiente rodoviário urbano complexo, com a participação de atores (figura 4.2)

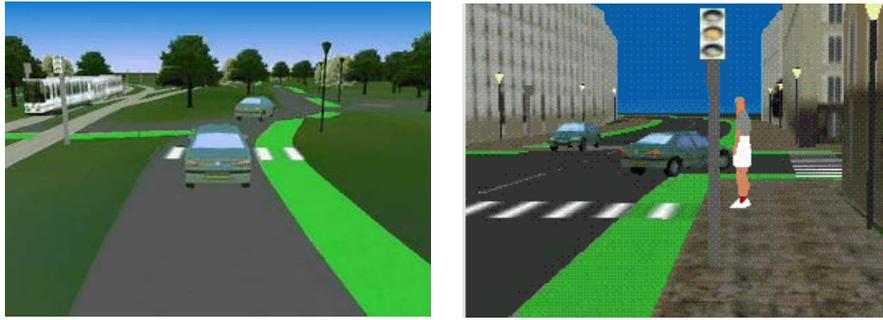


Figura 4.2 Ambiente rodoviário urbano (Thomas, 2000).

O ambiente urbano apresentado por Thomas et al., é criado recorrendo ao modelador interativo VUEMS sobre uma definição do terreno em mapa de elevação (Donikian, 1997). O uso de um modelador interativo não é adequado à geração de um ambiente rodoviário extenso de forma automática e eficiente, uma vez que requerem um controlo demasiado elevado pelo preparador para produzir modelos.

O projeto OpenDRIVE propõe um *standard* para a completa descrição de uma estrada, de modo a ser compatível com diversos sistemas de simulação (OpenDRIVE, 2010). É referido que a norma proposta permite a parametrização das principais características de estradas reais. Um modelador interativo que usa o *standard* proposto pelo projeto OpenDRIVE é o *Road Designer*⁵. Este modelador, além de gerar o modelo visual, gera uma descrição do ambiente rodoviário no formato definido no projeto OpenDRIVE. No entanto não são conhecidas ferramentas de geração automática de modelos neste formato. Este formato também não permite a descrição integrada de um ambiente rodoviário que inclua a definição dos nós, da rede topológica, corredores (definição de alto nível da ligação), estrada e terreno. Por outro lado, a organização num único ficheiro (estrutura) da definição do eixo da via, mesmo para estradas de pequena extensão, torna impraticável qualquer tentativa de edição manual pelo preparador do modelo.

4.2 Geração de redes

Vários trabalhos de relevo têm sido realizados com objetivos relacionados com a geração de redes rodoviárias. Nestes trabalhos, as redes rodoviárias geradas seguem tipicamente um determinado padrão: ortogonal, radial ou em ramificação (Kelly, 2008; Sun, 2002).

Geuter et al. e Weber et al., apresentam uma metodologia de geração contínua de modelos de cidades pseudo-infinitas (Geuter, 2003; Weber, 2009). A metodologia apresentada foca-se essencialmente na geração de modelos de cidades e na geração de modelos de edifícios, resultando apenas redes rodoviárias urbanas.

⁵ www.vires.com/docs/Rod201306.pdf

Um sistema chamado Citygen, apresentado por Kelly e McCabe, destina-se a criar a geometria urbana típica de uma cidade moderna e baseia-se numa variedade de padrões de redes de estradas, que o utilizador pode modificar (Kelly, 2008). A fase final da geração de modelos é a construção de edifícios.

Os resultados obtidos por estes métodos são usáveis pela maioria das aplicações de simulação. O problema destas abordagens é a necessidade de um controlo excessivo pelo preparador do ambiente para obter modelos realistas. Por outro lado, o uso de modelos predefinidos de redes não é adequado quando é requerido um ambiente rodoviário específico. Adicionalmente, estes métodos não produzem redes rodoviárias extraurbanas. As experiências de simulação de condução podem necessitar de ambientes rodoviários mistos, que combinem traçado em ambiente urbano e rural.

Uma metodologia de geração de uma rede rodoviária que integra diferentes tipologias de estradas, autoestradas, estradas principais e estradas secundárias, é apresentada por Galin et al. em (Galin, 2011).

Nesta abordagem, a criação da rede rodoviária é iniciada pela geração da rede de autoestradas, seguindo-se a rede principal e por último a rede secundária (figura 4.3).

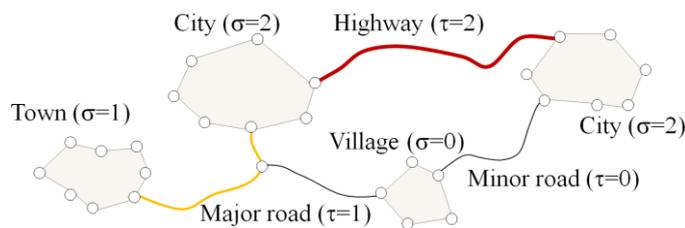


Figura 4.3 Rede hierárquica de estradas (Galin, 2011).

Cada tipologia de rede é criada de forma independente e no final é realizada a sobreposição dos diferentes tipos de estradas numa única rede rodoviária. No final, todas as estradas são sobrepostas numa única rede de estradas. O objetivo é a fusão de algumas partes de caminhos rodoviários próximos, através da inserção de nós interseções (*steiner points*). Com o modo como este problema é tratado, fazendo a fusão dos diferentes grafos de redes de estradas, podem resultar novas interseções entre estradas próximas e exigir que alguns segmentos das estradas tenham que ser novamente reanalisadas.

Soon Teoh descreve um processo baseado no Autopolis (Teoh, 2007) para a criação automática de cidades realistas, onde os pontos de interesse da cidade são localizados estrategicamente em função das características geográficas do terreno e das regras de planeamento de cidades. Como exemplo, os aeroportos devem ser preferencialmente localizados em zonas planas e junto ao mar, para permitir a expansão futura (figura 4.4) (Teoh, 2008).

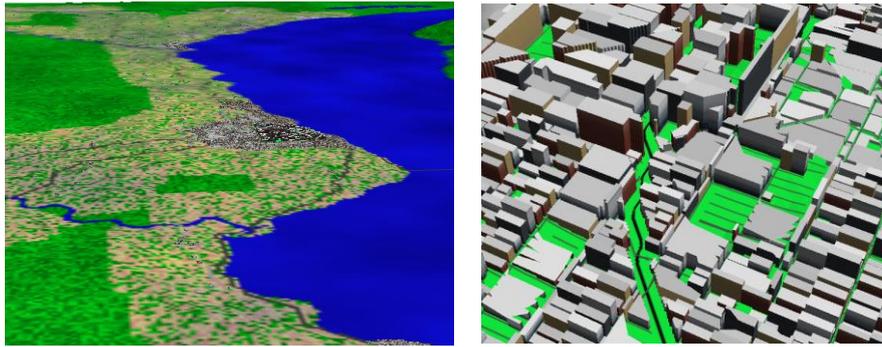


Figura 4.4 Visão da cidade (Teoh, 2008).

O processo fixa primeiro as zonas importantes da cidade, como centros comerciais, centros históricos e áreas residenciais. Depois, é construída a rede de autoestradas e estradas principais. Por último é construída a rede urbana por toda a cidade.

Sun et al. apresentam uma metodologia para a criação de uma rede rodoviária virtual baseada em padrões (Sun, 2002). Os padrões das estradas são criados com base em imagens modelo de entrada e num sistema de regras. É utilizado, um mapa da densidade populacional em cada área como entrada e são produzidos padrões de ruas, com base nas restrições geográficas e urbanas, tais como elevação do terreno e congestionamento urbano.

Chen et al. apresentam uma metodologia para a criação de uma rede rodoviária urbana baseada em *tensor fields* (figura 4.5) (Chen, 2008).



Figura 4.5 Geração de redes por *tensor fields* (Chen, 2008).

Os vetores tensores podem ser interactivamente criados e editados para conceber uma rede rodoviária, que é criada em várias fases. Primeiro o utilizador começa por desenhar um conjunto base de vetores tensores, recorrendo a uma interface gráfica. A seguir é criado o grafo das ruas usando as linhas da corrente dos vetores tensores previamente criados pelo utilizador. Por último, o grafo da rede é usado para criar todo o modelo tridimensional da cidade.

Este método é capaz de produzir padrões de redes do tipo radial ou em grelha e também é capaz de criar estradas segundo a restrições naturais do terreno, como por exemplo o trajeto de um rio. A interação exigida ao utilizador por este método, para produzir um

modelo rodoviário, não se enquadra na abordagem de geração automática de redes rodoviárias de grandes dimensões.

4.3 Geração de traçados

Várias abordagens têm sido tentadas para a geração de traçados rodoviários de forma automática. Por exemplo, *L-systems* e *CGA Shapes* são abordagens promissoras para diversos tipos de modelação procedimental, sobretudo devido às vantagens oferecidas em termos de repetibilidade (Coelho, 2007; Muller, 2006; Paris, 2001; Vanegas, 2010). Apesar disso podem não ser a solução mais adequada para produzir traçados rodoviários extensos para simulação de condução. É conhecido que o candidato de um ensaio experimental facilmente aprende o traçado de uma estrada, por isso a repetição de segmentos não é aconselhada. No estudo do comportamento de condutores automóveis, a componente de expectativa de um traçado é uma variável muito importante (Ostadabbas, 2011).

Kelly et al. apresentam um trabalho em que primeiro começam por gerar um conjunto de estradas principais, as quais são depois interligadas por estradas secundárias, criando a rede rodoviária de uma cidade (Kelly, 2008). Cada estrada é criada a partir de um conjunto de nós de controlo de alto nível, ou um esboço do percurso por onde a estrada deverá passar (figura 4.6).

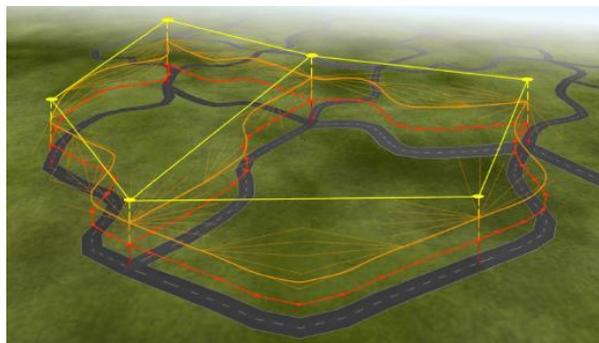


Figura 4.6 Geração da rede primária (Kelly, 2008).

O refinamento do traçado é depois processado, onde é conjugado o controlo de alto nível com a definição do terreno. Nesta abordagem apenas é tido em consideração a elevação do terreno na escolha do trajeto da estrada. Uma vez criada a rede principal é criada a rede secundária, utilizando *L-systems* com um conjunto de regras definidas pelo utilizador.

Algumas das ideias utilizadas nesta abordagem ao nível da rede da cidade podem ser aplicadas a redes rodoviárias em larga escala, particularmente o refinamento sucessivo dos traçados em níveis de detalhe crescente.

Galin et al. apresentam uma metodologia de geração procedimental de traçados de estradas (Galin, 2010). A geração do traçado é realizada recorrendo a um algoritmo

complexo, sobre um terreno definido em mapa de elevação. Em cada etapa do processo de geração do traçado da estrada sobre o modelo do terreno, a direção a seguir é determinada em função da avaliação local do custo de cada alternativa. O custo de cada alternativa é determinado recorrendo a uma função que avalia vários indicadores, como a relação com o terreno e a relação com as condicionantes (figura 4.7).

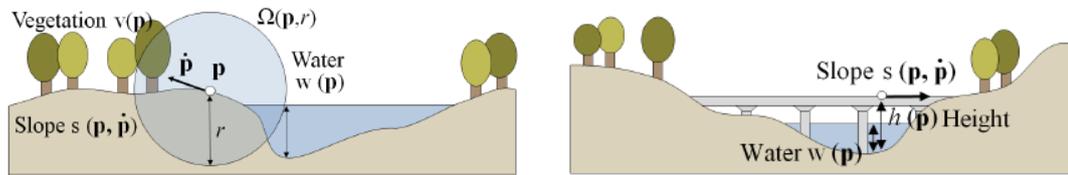


Figura 4.7 Avaliação local da trajetória da estrada (Galín, 2010).

O facto de ser utilizada uma função de avaliação local impede a correta avaliação e otimização global da solução final. O uso de uma abordagem que analise o custo por níveis de forma global poderia conduzir a uma melhor otimização dos traçados finais, produzindo modelos de qualidade. Dependendo do modelo de terreno e do tipo de estrada a gerar, determinar o número de alternativas a estudar pode-se tornar num problema demasiado complexo. Pela descrição do autor não se conclui que esta metodologia produza traçados rodoviários semelhantes aos encontrados em estradas reais, não sendo apresentada nenhuma avaliação conclusiva relativamente ao realismo dos modelos obtidos. A geração de um traçado rodoviário realista deve satisfazer um elevado número de condições, pelo que um algoritmo que tem por base o caminho mais curto, não se apresenta como a abordagem mais adequada. Na geração do modelo visual são instanciados modelos 3D, como pontes, túneis e cruzamento.

Ostadabbas et al. apresentam um método de geração de diferentes tipos de traçados rodoviários, em montanha, tipo autoestrada e residencial (Ostadabbas, 2011). Apesar de ser referido o facto do traçado de uma estrada apresentar um desenvolvimento imprevisível, isso é conseguido à custa de uma descrição minuciosa de todos os segmentos de estrada a que os autores designam por *layers*. O traçado da estrada é obtido pela especificação de um conjunto de curvas, com características parametrizáveis, sobre segmentos com extensão pré-definida. A introdução de curvas é feita pela parametrização da direção, extensão de desenvolvimento e ângulo de orientação, o que à partida não pressupõe a definição de curvas compostas (clotóide, arco, clotóide). A avaliação apresentada foca-se essencialmente no ambiente rodoviário, em particular no modelo dinâmico, não tratando com cuidado a questão do realismo do traçado. Apesar dos autores referirem que os resultados da avaliação apontam para modelos rodoviários realistas, não é referido o facto de o traçado gerado possuir características geométricas semelhantes às encontradas no mundo real. Por outro lado também não é referido que as características de traçado cumpram algum tipo de normas rodoviárias.

Nos trabalhos apresentados por Bayarri et al., são descritos métodos para a geração de ambientes rodoviários adequados para simulação de condução a partir de dados de projeto (Bayarri, 1996; Pareja, 1999). Cada vez que se pretenda obter um modelo de uma via, é exigida a prévia interação com a área de engenharia de vias, ou outras fontes, para obter a definição do traçado da via. Alguns destes métodos já foram explorados em trabalhos anteriores (Campos, 2003; Campos, 2007b).

A criação de modelos de estradas realistas para simulação de condução passa muitas vezes por processos manuais, trabalhosos e morosos, mesmo quando são disponibilizadas ferramentas interativas. Mesmo os trabalhos mais relevantes de geração automática de redes viárias não abordam especialmente a possibilidade da utilização dos ambientes gerados em simulação de condução em tempo real para fins científicos (Smelik, 2008; Galin, 2011).

Sempre que se pretende criar um ambiente de traçado realista para tarefas de condução para fins científicos é necessário um elevado nível de interação com o preparador do modelo, que muitas vezes passa por recorrer a especialistas na área de projeto de vias para obtenção do traçado. Uma alternativa a este problema passa por conceber um método de geração automática de traçados rodoviários.

Sumário

Neste capítulo foram apresentados os trabalhos mais relevantes na modelação de ambientes, na geração de redes e traçados rodoviários de estradas, estudados no âmbito da realização deste trabalho de investigação. Apesar de reconhecido o contributo destas abordagens, persiste a necessidade de tornar mais expedito o processo de preparação de ambientes rodoviários adequados para simulação de condução. A preparação destes ambientes deve produzir definições de modelos de forma integrada, desde os nós de ligação, rede, traçado até a geração dos modelos geométricos das estradas e do terreno. Os traçados de estradas gerados devem apresentar características geométricas semelhantes às encontradas no mundo real. Deve ser possível interação do preparador do modelo na definição semântica gerada, de forma a permitir impor os requisitos específicos de cada trabalho experimental. A possibilidade de geração de modelo a partir de dados de projeto ou outras fontes deverá ser uma funcionalidade a considerar.

No capítulo seguinte é apresentado o método concebido para a geração procedimental de ambientes rodoviários adequados para simulação de condução.

Geração de Ambientes Rodoviários

Neste capítulo propõe-se um método concebido para a geração de forma integrada de ambientes rodoviários completos, desde os nós de ligação até à obtenção dos modelos tridimensionais. A definição do ambiente rodoviário gerado inclui também uma descrição semântica. O processo de geração do ambiente rodoviário está organizado hierarquicamente em camadas, como ilustrado na figura 5.1.

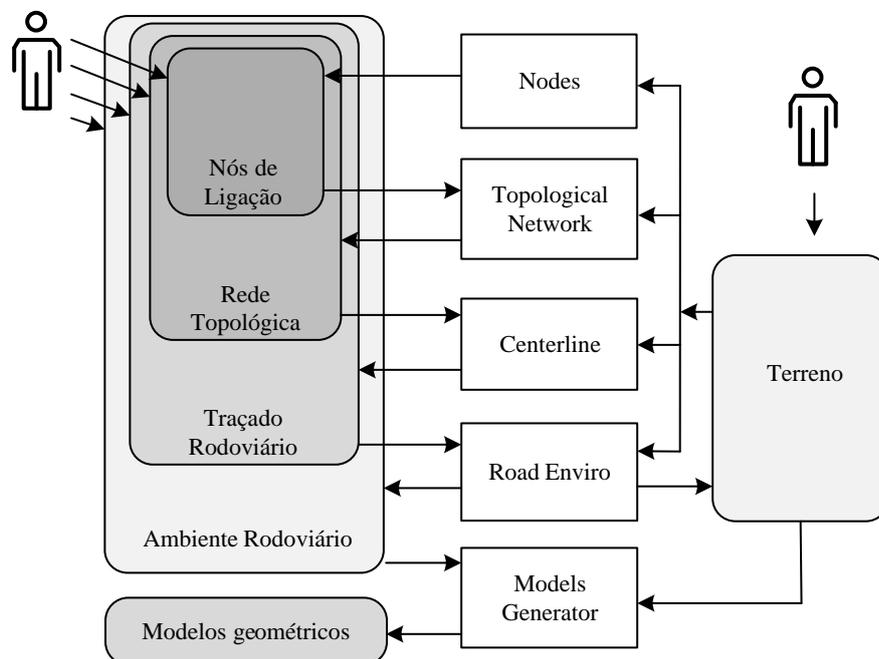


Figura 5.1 Arquitetura geral.

Em todo o processo de geração do ambiente rodoviário é considerada a definição do terreno. A definição do terreno inclui a especificação do relevo e das condicionantes. Uma condicionante é uma restrição que pode influenciar as trajetórias das estradas,

como por exemplo, a floresta, cursos de água, edificações, entre outros elementos típicos.

A definição do relevo de um terreno é tipicamente obtida em mapa de elevação, em que cada célula contém o valor da cota (z). A geração do relevo de um terreno pode ter por base algoritmos fractais que, de forma simples e rápida, definem o seu contorno altimétrico (Teoh, 2009). A definição do relevo de um terreno pode ser ainda melhorada através de algoritmos de simulação de erosão provocada por chuvas, ventos entre outros processos naturais. O processo de geração do relevo do terreno não é tratado no âmbito deste trabalho.

Nesta abordagem, a geração procedimental do ambiente rodoviário inicia-se pelo módulo *Nodes*, o qual cria uma definição de nós de ligação num modelo de terreno (*Nós de Ligação*). Estes nós correspondem a lugares ou localidades que se pretende ligar por estrada. Este módulo, recebe como entrada, a definição do terreno onde os nós irão ser distribuídos. Na distribuição de nós devem-se ter-se em consideração as zonas costeiras, os cursos de água, entre outros elementos que condicionem de forma natural a sua localização. Zonas planas junto à costa são propícias ao desenvolvimento de grandes centros urbanos, com a presença de zonas industriais, aeroportos marítimos e terrestres, entre outros.

Na lista de nós produzida, cada nó tem associada a sua localização geográfica e um fator de importância. O fator de importância é utilizado para organizar os nós por tipologia, como por exemplo cidade, vila ou aldeia. A rede de estradas a definir pelo módulo *Topological Network* usa esta organização para definir as diferentes redes de estrada, como por exemplo, autoestrada, secundária e nacional.

O módulo *Topological Network* é responsável por gerar uma definição topologia da rede rodoviária (*Rede Topológica*). A rede topológica de estradas é criada hierarquicamente em níveis, à semelhança do que acontece em outros trabalhos semelhantes (Teoh, 2008; Weber, 2009; Galin, 2011). Este módulo, recebe como dados de entrada a definição dos nós de ligação, gerada pelo módulo *Nodes*, e produz uma definição topológica, que especifica a tipologia da ligação entre cada par de nós, (autoestrada, secundária ou nacional).

Uma rede de autoestradas, tipicamente é planeada para a interligação de grandes centros urbanos. A rede primária de autoestradas é gerada a partir dos nós do tipo cidade.

A rede secundária é originada pelos nós do tipo vila, sendo planeada para interligar cidades a vilas e vilas a vilas. A rede de estradas nacionais é criada a partir dos nós do tipo aldeia, sendo planeada para interligar vilas a aldeias e aldeias a aldeias. Na tabela 5.1 apresentam-se os tipos de ligações consideradas entre pares de nós.

Tabela 5.1 Matriz de ligações entre nós.

	Cidade	Vila	Aldeia
Cidade	AE	ES	{EN, ES}
Vila	ES	ES	EN
Aldeia	{EN, ES}	EN	EN

AE - Autoestrada, ES - Estrada secundária, EN - Estrada nacional.

Na geração da definição da rede topológica poderão ser criados nós adicionais de interligação, os quais têm associado um fator de importância de zero, uma vez que não geradores de tráfego.

O módulo *Centerline* é responsável por gerar a definição do traçado de cada estrada da rede rodoviária (*Traçado de Estradas*). Este módulo recebe a definição topológica da rede gerada pelo módulo *Topological Network* e, para cada ligação, gera a definição do traçado, tendo em consideração a definição do relevo do terreno e as respetivas condicionantes.

O método de geração de traçados foi inspirado nos procedimentos utilizados em engenharia de vias. A geração do traçado é realizada por fases, com um nível de detalhe crescente. Em cada fase são geradas várias alternativas de traçado. Cada alternativa de traçado é analisada individualmente em função do relevo do terreno e das condicionantes. Depois de avaliadas todas as alternativas num determinado nível, é escolhida a melhor, avançando-se para as fases seguintes. O processo desenvolve-se até se obter uma definição de traçado com o detalhe adequado para o desenvolvimento do traçado em planta e em perfil longitudinal. Por último, é definido um perfil transversal em função do tipo de estrada em estudo.

Os traçados produzidos devem ter em consideração as normas de traçado e as boas práticas em projeto de vias, a fim de produzir modelos de estradas com características geométricas semelhantes às encontradas no mundo real.

A definição de uma estrada engloba ainda a especificação da sinalização horizontal e vertical. A definição da sinalização é realizada pelo módulo *Road Enviro*. Este módulo recebe como dados de entrada o traçado de uma estrada e em função deste, gera proceduralmente uma definição da sinalização. A sinalização deve ter em consideração as normas respetivas, especificando para cada tipo de via a marcação rodoviária horizontal e a sinalização vertical adequada.

Na implantação de estradas reais são consequentemente efetuadas alterações ao terreno, como escavação e aterros. Da mesma forma, a implementação de estradas virtuais implica a edição do modelo de terreno, realizada também pelo módulo *Road Enviro*. Este módulo recebe a definição do traçado de cada estrada produzida pelo módulo *Centerline* e adequa o modelo do terreno à respetiva definição geométrica da via. Deste

processo poderão resultar taludes de escavação e taludes de aterro, apresentados na secção 3.5.4.

O módulo *Models Generator* é responsável pela geração procedimental dos modelos geométricos das estradas e do terreno (*Modelo Geométrico*). Para a geração do modelo geométrico das vias são explorados os métodos de modelação de estradas de grandes dimensões apresentados anteriormente em (Campos, 2007b). O modelo visual do ambiente rodoviário é enriquecido com representações visuais dos elementos de sinalização especificados pelo módulo *Road Enviro* e um conjunto de objetos envolventes típicos da região ou país que se pretende representar. A povoação do ambiente virtual com estes elementos, definidos pelo módulo *Road Enviro*, tornam a experiência de simulação de condução mais realista e imersiva, como também referido em (Ostadabbas, 2011).

No final do processo de geração do ambiente rodoviário é também obtida uma descrição semântica de todo o modelo (*Modelo Semântico*). A descrição semântica é uma caracterização de alto nível do ambiente rodoviário gerado, que permite a parametrização de atores no ambiente simulado, e.g. outros veículos, peões, ou qualquer outro elemento animado. A inclusão de atores é fundamental para a implementação de experiências realista de simulação de condução para fins científicos (Ostadabbas, 2011). A definição semântica permite ainda a parametrização de eventos de tráfego específicos, produção de relatório, entre outros.

A estrutura em camadas apresentada para a geração procedimental de um ambiente rodoviário, oferece de forma natural a possibilidade do preparador de modelos intervir no processo de geração a vários níveis. Para além da eventual interação direta com cada um dos módulos é possível influenciar a resultado final através da manipulação do resultado produzido por qualquer módulo. Como exemplo, o preparador pode adicionar novos nós de ligação à definição gerada procedimentalmente, editar ou apagar ligações por estrada, redefinir ou alterar o traçado de uma estrada ou editar a definição do modelo de terreno.

Esta característica permite o total controlo do resultado gerado por cada módulo em cada etapa do processo. A possibilidade de interação em qualquer fase do processo de geração do modelo traduz-se num contributo relevante deste método que permite a produção totalmente controlável de modelos, permitindo responder aos requisitos específicos de cada ensaio experimental.

5.1 Nós de ligação

O método proposto para a criação de ambientes inicia-se pela definição dos nós de ligação, que serão interligados por estrada. Estes nós de ligação são gerados procedimentalmente pelo módulo *Nodes*.

Os nós são distribuídos sobre uma área de terreno. Nesta distribuição são consideradas as características naturais do terreno, como o relevo, zonas costeiras e cursos de água. Também devem ser consideradas as respetivas condicionantes, como edificações, rede viária existente e zonas classificadas.

Cada nó de ligação gerado é caracterizado pela sua localização, nome, fator de importância e tipo. O fator de importância pode corresponder à população residente associada a esse nó e neste trabalho é usado para organizar os nós por tipologia. Na organização de nós são consideradas três tipologias: nós do tipo cidade, nós do tipo vila e nós do tipo aldeia. A partir desta organização tipológica de nós, são criadas as diferentes redes de estradas.

O fator de importância (população) também é usado para avaliar a propensão do nó para a criação de tráfego na rede.

O preparador do modelo pode a qualquer instante impor o valor de qualquer um dos parâmetros associados aos nós.

5.2 Rede topológica

Uma vez criada a definição dos nós de ligação, são geradas as diferentes tipologias de redes de estradas consideradas: rede de autoestradas, rede estradas secundárias e rede estradas nacionais.

Uma rede (R), como por exemplo uma rede rodoviária pode ser definida por um conjunto de nós (N) e ligações (L) que os interligam (5.1).

$$R = \{N, L\} \quad (5.1)$$

Cada ligação (L_{ij}) faz a interligação entre dois nós distintos, por exemplo N_i e N_j (5.2).

$$L_{ij} = (N_i, N_j) \quad (5.2)$$

No caso de uma rede rodoviária, os nós são interligados por estradas. Uma rede rodoviária pode ser definida por uma estrutura de ligações em níveis: rede de autoestradas, rede de estradas secundárias, rede de estradas urbanas ou nacionais (Teoh, 2008; Weber, 2009).

A rede de autoestradas é desenhada para interligar cidades e grandes centros urbanos, permitindo a circulação de um grande número de veículos entre diferentes nós da rede. A rede secundária é concebida para pequenas deslocações, interligando vilas a vilas e vilas a cidades, servindo pequenos aglomerados populacionais. A rede de estradas urbanas ou nacionais pretende servir as deslocações dentro da cidade ou aldeia, interligando aldeias a aldeias e aldeias a vilas. As redes de estradas urbanas, tipicamente seguem um determinado padrão: ortogonal, radial ou em ramificação (Sun, 2002).

O método proposto para a geração de uma rede, inicia-se pelos nós do tipo cidade, definindo a rede de autoestradas. Os nós são organizados numa lista ordenada por ordem decrescente de população. A distância entre todos os pares de nós ligados é anexada ao grafo, como se ilustra na figura 5.2.

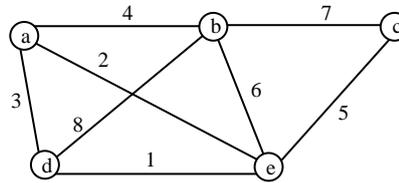


Figura 5.2 Refinamento da rede de autoestradas.

Para a criação da rede de autoestradas, todas as ligações possíveis entre pares de nós do tipo cidade são analisadas. O refinamento da rede inicia-se pelos nós com maior índice de população. No processo de refinamento da rede é avaliado o custo e o benefício de cada ligação. Deve ser considerada a relação com o relevo do terreno e as respetivas condicionantes, na avaliação do custo de construção de cada ligação, mesmo quando realizada com pouco pormenor técnico. A decisão de manter uma ligação entre um par de nós (N_A e N_B) depende da diferença entre o custo estimado de construção da estrada e o benefício permitido pela concretização dessa ligação. Ambos estes custos estão relacionados com o índice de utilização (U). O índice de utilização (U) depende da população residente nos nós extremos (P_A e P_B) e da extensão (L) da ligação (5.3).

$$U = (P_A * P_B) / L^2 \quad (5.3)$$

O benefício (B) é determinado em função do índice de utilização (U), da extensão da estrada em análise ($L_{\text{ligação}}$), da extensão do percurso alternativo ($L_{\text{alternativo}}$) entre os nós N_A e N_B , e do custo de operação (C_{op}) (5.4). Considera-se como percurso alternativo, o trajeto mais curto entre os nós N_A e N_B , admitindo que a ligação em análise não existe.

$$B = U * (L_{\text{alternativo}} - L_{\text{ligação}}) * C_{op} \quad (5.4)$$

O benefício (B) representa a economia no percurso de os veículos se deslocarem pela ligação em análise, comparativamente com o percurso alternativo. Quanto maior for a diferença entre a extensão da ligação em análise ($L_{\text{ligação}}$) e a extensão do percurso alternativa ($L_{\text{alternativo}}$), maior é o benefício para os utilizadores em construir a ligação.

Para determinar o percurso alternativo mais curto entre dois nós distintos na rede, utiliza-se o algoritmo Dijkstra (Black, 2006). O custo de operação (C_{op}) estima o custo por quilómetro de viagem de um veículo entre dois nós na rede e inclui fatores como: combustível, tempo e duração da viagem. Se o benefício (B) da estrada em análise for maior que o custo estimado de construção, a ligação é concretizada, caso contrário a ligação é eliminada da definição final da rede. No processo de simplificação da rede é sempre garantido que um nó de qualquer tipo (cidade, vila ou aldeia) nunca fica

completamente desligado da rede. Esta condição garante a existência de pelo menos uma estrada a ligar esse nó à rede de estradas.

Após a simplificação da definição inicial da rede de autoestradas, pode verificar-se a existência de interseções entre estradas. Nestes casos são gerados nós de interligação adicionais, com um fator de importância (população) associado de zero, representados a cinzento na figura 5.3.

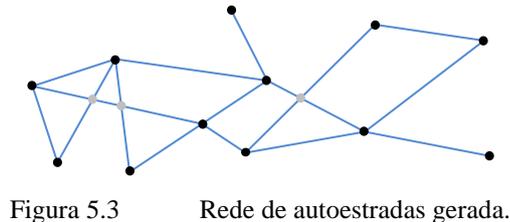


Figura 5.3 Rede de autoestradas gerada.

Depois de se obter a definição da rede de autoestradas é tratada a rede de estradas secundárias. Nesta fase do processo, à rede de autoestradas obtida no passo anterior, são adicionados os nós do tipo vila. Todas as ligações possíveis por estrada secundária entre vilas e entre vilas e cidades são estudadas, utilizando o mesmo procedimento aplicado para a rede de autoestradas. A definição da rede de autoestradas gerada anteriormente não é modificada, nesta fase apenas são analisadas as ligações por estrada secundária.

A definição da rede só fica completa quando tratadas as estradas nacionais, considerando agora os nós do tipo aldeia. O processo de refinamento aplicado à rede nacional é o mesmo que o utilizado nas redes anteriores, autoestrada e secundária.

É possível definir qual a ordem de tratamento das ligações. Os métodos disponíveis são: ordem decrescente e crescente de população; ordem decrescente e crescente de tráfego. O método descrito para a criação da rede de estradas, corresponde ao parametrizado por defeito, ordem decrescente de população. Foi parametrizado este método, por produzir resultados de definições de redes mais próximas das encontradas no mundo real, como discutido em (Campos, 2015c).

O processo de geração da rede rodoviária pode ser parametrizado no sentido de se obter uma representação de estradas, autoestradas, secundárias e nacionais, adequada e similar à rede que se pretende simular. Os principais parâmetros que o preparador do modelo pode definir são:

- Índice de classificação de nós por tipo (cidade, vila e aldeia);
- Custo de construção;
- Custo de operação;
- Método de ordenação.

No final do processo obtém-se uma definição de uma rede de ligações, entre os nós do tipo cidade (preto), vila (vermelho) e aldeia (laranja), como ilustrado na figura 5.4.

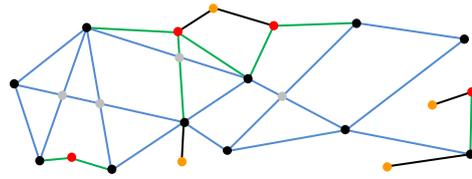


Figura 5.4 Rede topológica de estradas.

A definição da rede gerada pode ser consultada e editada pelo preparador do modelo do ambiente rodoviário. Após obter a definição topológica da rede viária, é necessário gerar o traçado rodoviário de cada estrada.

5.3 Traçado de estradas

A geração de um traçado de uma estrada é tratado de forma global, estudando a ligação entre dois nós tendo em consideração a definição do modelo do terreno e as respetivas condicionantes, como se ilustra na figura 5.5.

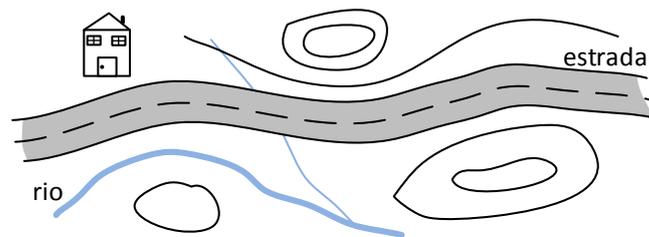


Figura 5.5 Geração do traçado da ligação.

A geração do traçado é realizada em diferentes níveis de detalhe. Em cada nível de detalhe, a definição do traçado gerada, tem associada uma largura. A definição gerada em cada nível de detalhe, com uma largura associada, é designada em engenharia de vias por corredor. No final do processo de geração sucessiva de corredores obtém-se uma definição do traçado, designada em engenharia de vias por traçado em alinhamentos retos. A partir da definição do traçado em alinhamentos retos desenvolve-se o traçado em planta, com a introdução de curvas compostas. No desenvolvimento do traçado em planta é também realizado o cálculo da sobrelevação. Após obter o traçado em planta desenvolve-se o traçado em perfil longitudinal com a introdução de concordâncias verticais. Por último especifica-se o perfil transversal.

5.3.1 Definição de traçado rodoviário

Como descrito em (Campos, 2012; Campos, 2015d), um traçado rodoviário (T) é constituído por um conjunto ordenado de vértices (V) e um conjunto de segmentos de traçado (S) que os ligam (5.5).

$$T = \{V, S\} \quad (5.5)$$

Um segmento de traçado S_i corresponde a uma ligação em: linha reta, arco de circunferência ou clotóide (5.6).

$$S_i = (\text{reta, arco, clotóide}) \quad (5.6)$$

Considerando uma área A e dois nós de ligação designados por \mathbf{m} e \mathbf{n} , pode ser designado por P o conjunto de soluções de traçado (T) em A que interligam os nós \mathbf{m} e \mathbf{n} (5.7).

$$P = \{T\} \quad (5.7)$$

O objetivo consiste em determinar um traçado T' entre os nós \mathbf{m} e \mathbf{n} que minimize a função de custo $C(T)$, que avalia a influência de diferentes indicadores, como por exemplo a relação com o relevo do terreno e respetivas condicionantes, entre outros (5.8).

$$C(T') = \min C(T_i), \text{ em que } T_i \in P \quad (5.8)$$

5.3.2 Estudo de alternativas de traçado

A função de custo permite determinar qual o melhor traçado T , avaliando o custo individual de vários indicadores. Os indicadores considerados na função que avalia as alternativas de traçados são: zona classificada, construção em ponte, construção em túnel, movimento de terras, construção da via e custo de utilização.

Uma zona classificada é definida como uma área geográfica em planta que representa uma restrição em particular, como por exemplo água, floresta ou edificações. Para determinar o impacto do traçado numa zona classificada é necessário calcular a área afetada pela passagem da estrada, que corresponde à interseção da área da estrada com a área da condicionante, como se ilustra na figura 5.6.

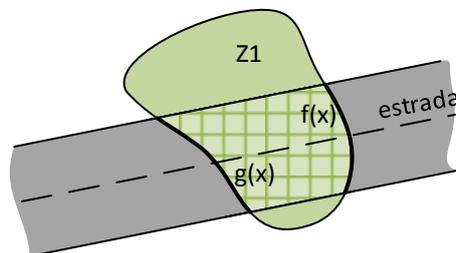


Figura 5.6 Zona classificada.

A área da zona classificada atravessada pela estrada pode ser calculada pelo integral da diferença das funções $f(x)$ e $g(x)$, que delimitam as fronteiras da condicionante, no domínio da secção da estrada (5.9).

$$\text{Área} = \int (f(x) - g(x)) dx \cong \sum_{i=0}^n A_{\text{pixel } i} \quad (5.9)$$

Alternativamente, as condicionantes podem ser representadas por imagem, em que o valor do *pixel*, representa a existência ou não de condicionante. A área da zona classificada atravessada pela estrada pode ser calculada, pelo somatório das áreas dos *pixels* ($A_{\text{pixel } i}$) abrangidos pela passagem da estrada (5.9).

Para determinar a extensão da estrada que é construída em ponte ou túnel é feita uma análise à diferença entre a cota da estrada e a cota do terreno ao longo do eixo da via.

É considerada construção em ponte, sempre que a diferença entre a cota da estrada e a cota do terreno seja superior ao valor de referência (h_{refponte}), como se ilustra na figura 5.7.

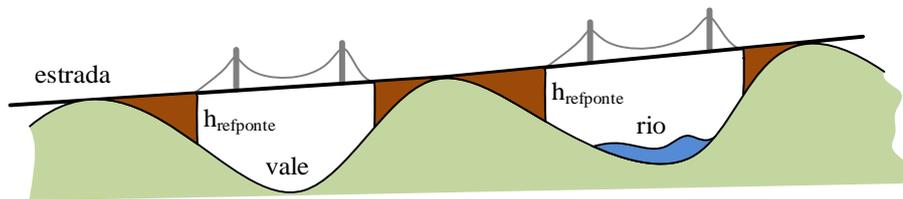


Figura 5.7 Construção em ponte.

Também é considerada construção em ponte sempre que a estrada atravesse água, como por exemplo, rio ou lago.

É considerada construção em túnel sempre que a diferença entre a cota do terreno e a cota da estrada seja superior ao valor de referência ($h_{\text{ref túnel}}$) e esse valor se mantiver no mínimo numa extensão superior ao valor de referência ($L_{\text{túnel}}$) para construção em túnel, como se ilustra na figura 5.8.

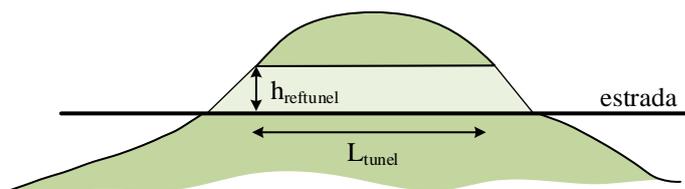


Figura 5.8 Construção em túnel.

A avaliação do movimento de terras é também realizada pela análise das diferenças (h) entre a cota do terreno e a cota da estrada. O movimento de terras tem associados dois tipos de volumes, o volume de movimento de terras de escavação e o volume de movimento de terras de aterro (figura 5.9).

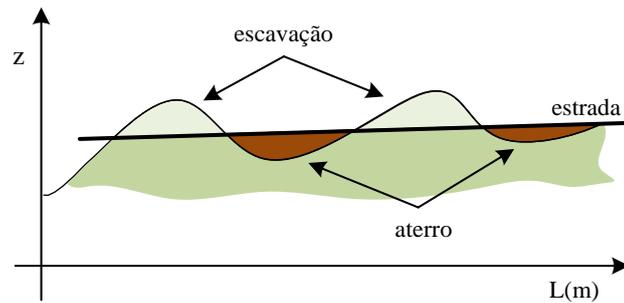


Figura 5.9 Movimento de terras.

O volume de aterro é calculado sempre que se verificam as condições (5.10).

$$0 < h \leq h_{\text{refaterro}} \wedge \overline{\text{água}} \quad (5.10)$$

O volume de escavação é calculado quando se verificam as condições (5.11).

$$0 < h \leq h_{\text{refexc}} \wedge L' < L_{\text{tunnel}} \quad (5.11)$$

Conhecendo a função $g(x,y)$ da superfície do terreno e a função $f(x,y)$ da região (R) do troço da estrada (figura 5.10), o volume total do movimento de terras pode ser calculado pela equação (5.12).

$$\text{Volume} = \iint_R |f(x,y) - g(x,y)| \, dx dy \cong \sum_{i=0}^n V_{\text{prisma } i} \quad (5.12)$$

O volume de terras também pode ser calculado pelo somatório do volume dos prismas, do terreno abrangido pela passagem da estrada, como se ilustra na figura 5.10.

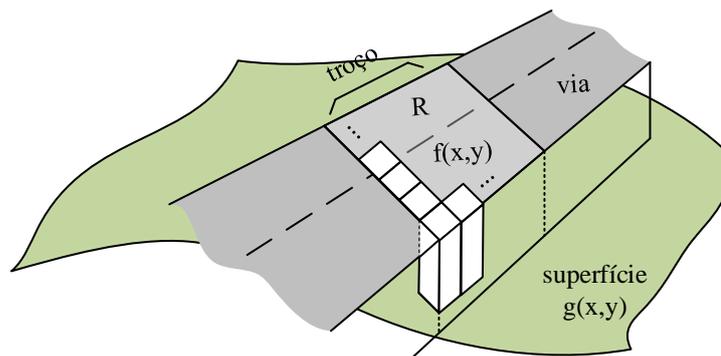


Figura 5.10 Volume do movimento de terras.

Num troço de estrada, além de minimizar os volumes de aterro e escavação deve-se tentar minimizar a diferença (Dv) entre os dois volumes (5.13).

$$Dv = |V_{\text{aterro}} - V_{\text{escavação}}| \quad (5.13)$$

O custo associado ao movimento de terras é determinado utilizando o maior dos dois volumes calculados, aterro e escavação.

Por último, na avaliação de alternativas de traçado também é considerada a variação em altimetria (d_z) ao longo do eixo da via, calculada pela equação 5.14.

$$d_z = \sum s_i + \sum |d_i| \quad (5.14)$$

Onde, s_i corresponde à variação em altimetria positiva (subidas) e d_i à variação em altimetria negativa (descidas).

A integração deste indicador na avaliação de alternativas permite ao preparador do traçado parametrizar a geração de estradas com diferentes sinuosidades em perfil longitudinal (d_z), em função da utilização prevista (secção 5.2).

Os valores de referência dos indicadores analisados no estudo de alternativas foram determinados recorrendo a especialistas da área de projeto de traçado (Campos, 2014).

5.3.3 Traçado de corredores

O processo de geração de corredores foi concebido segundo um método de refinamento sucessivo do nível de detalhe. Partindo da definição de uma ligação entre dois pontos, começa-se por gerar um conjunto de soluções de alto nível (corredores), com pouca pormenorização. A escolha da melhor hipótese em cada etapa do processo é realizada recorrendo a uma função de custo (secção 5.3.2), como também abordado em (Galin, 2010). A avaliação de diferentes alternativas de corredores num determinado nível, implica estudar as diferentes hipóteses de traçado. Para o estudo comparativo de hipóteses de traçado de corredores e para este nível de abstração da definição do terreno, uma boa aproximação, consiste em utilizar uma largura transversal de referência ao longo do traçado. O uso de um perfil transversal de referência ao longo do traçado é semelhante ao que acontece nesta fase de projeto durante a conceção de uma estrada em engenharia de vias. Na tabela 5.2, apresentam-se os valores de perfil transversal de referência definidos para cada tipo de estrada considerada.

Tabela 5.2 Largura transversal de referência.

	Autoestrada (120 km/h)	Estrada secundária (90 km/h)	Estrada nacional (60 km/h)
L_{ref} (m)	40	22	12

A largura transversal de referência (L_{ref}) utilizada na avaliação de indicadores no estudo de alternativas de corredores, reflete uma aproximação obtida com base na ocupação no solo pela plataforma via, acrescida dos elementos adjacentes (i.e., taludes de escavação e aterro, barreira de proteção para animais).

A utilização do nível de detalhe adequado permite gerar e estudar um qualquer número de propostas sem prejudicar o processo em termos de esforço computacional. O uso de

muitos níveis de detalhe dificulta a identificação da solução final ideal porque, em cada nível, a avaliação da estrada e da sua relação com o terreno e respetivas condicionantes é feita com pouco detalhe, orientando e condicionando as escolhas nos níveis seguintes. A partir do momento em que a localização de um vértice do traçado é determinada, esta não volta a ser processada. Por outro lado, um número reduzido de níveis implica um maior peso computacional a processar a relação com o relevo do terreno e condicionantes, ao analisar com maior detalhe cada alternativa de traçado. Esta estratégia da geração do traçado por níveis de detalhe foi inspirada nos métodos utilizados em engenharia de vias para conceção de um traçado rodoviário (secção 3.2), o que facilitou a parametrização do processo e a escolha do número de níveis proposto. A criação da tabela 5.3 foi inspirada nos procedimentos utilizados em engenharia de vias para a conceção de traçados, em que o projeto se desenvolve em diferentes fases. Na tabela 5.3 os parâmetros L_{min} e L_{max} correspondem aos limites mínimos e máximos da distância entre os dois nós que se pretendem ligar por estrada e permitem determinar em que nível se inicia o processo de geração de corredores. Independentemente do nível em que o processo se inicia, a geração de um novo corredor é realizada sobre uma definição de um corredor mais largo. A geração de um novo corredor, com largura definida pelo parâmetro *Corredor gerado*, é realizada dentro de um corredor com largura definida pelo parâmetro *Corredor inicial*. Este processo termina quando já não existir alinhamentos com extensão superior à condição de paragem definida pelo parâmetro $L_{paragem}$. Pela tabela 5.3, é possível determinar em que nível o processo se inicia e quantas etapas serão realizadas até obter a definição do traçado em alinhamentos retos com o detalhe adequado.

Tabela 5.3 Parâmetros utilizados para definição dos corredores (km).

Nível	$L_{min} >$	$L_{max} \leq$	Corredor inicial (largura)	$L_{paragem} <$	Corredor gerado (largura)
1	$0,02 * V_b (i)$	10	5	$0,02 * V_b (i)$	1
2	10	50	20	10	5
3	50	200	100	50	20
4	200	1000	500	200	100
5	1000	5000	2000	1000	500

(i) V_b , velocidade de base em km/h. Por exemplo, $V_b=120$ km/h, $L_{paragem} = L_{min} = 2.4$ km.

Como exemplo: uma ligação inicial entre dois nós distantes 150km entre si, pela tabela 5.3, o processo de geração do traçado inicia-se no nível 3 ($50 < 150 \leq 200$). A partir de um corredor inicial com 100 km de largura é gerado um novo corredor com 20 km de largura. Na geração do novo corredor, a definição do traçado é refinada até que todos os alinhamentos possuam uma extensão inferior a 50 km, valor definido no parâmetro $L_{paragem}$. O refinamento de um corredor é descrito na secção 5.3.4. Após obter a definição

de traçado do novo corredor, o processo continua para o nível de detalhe seguinte, que neste exemplo corresponde ao nível 2. No nível 2 é realizado o mesmo procedimento que o descrito anteriormente para o nível 3.

Independentemente do nível em que o processo se inicia a geração de corredores é realizada até chegar ao nível 1, nível em que é produzida uma definição do traçado em alinhamentos retos.

5.3.4 Vértices do corredor

A geração de um novo corredor tem por base a definição de um corredor anterior. O processo de geração de um novo corredor consiste na divisão binária sucessiva dos alinhamentos da definição de entrada, adicionando novos vértices ao traçado. A figura 5.11 exemplifica a obtenção de um novo vértice, na geração de corredores. Entre os vértices A e B da figura 5.11, é determinado o ponto médio (m), obtendo-se o vetor \overrightarrow{Am} . É introduzida uma perturbação no módulo do vetor \overrightarrow{Am} para que os alinhamentos adjacentes ao ponto m tenham extensões diferentes. Do resultado dessa perturbação obtém-se o vetor \overrightarrow{AP} . De seguida calcula-se o vetor tensor $\overrightarrow{PP'}$, que é perpendicular ao vetor \overrightarrow{Am} , permitindo deslocar o novo vértice para o ponto P'. No cálculo do novo vértice situado no ponto P' é considerada a largura do corredor, para que o novo vértice não se desloque para além dos limites definidos pelo corredor de entrada, como se ilustra na figura 5.11.

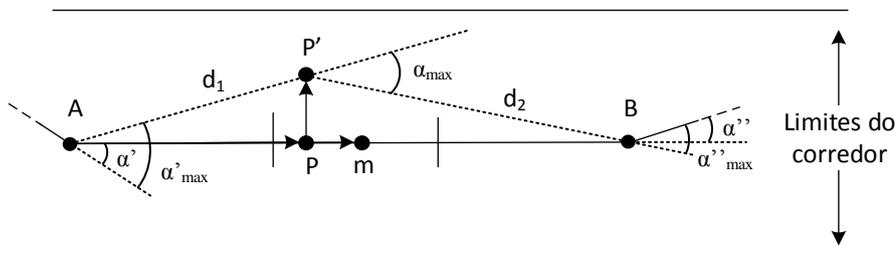


Figura 5.11 Geração dos vértices do corredor.

Na determinação do novo vértice P' também são considerados os ângulos α_{max} entre os novos alinhamentos e os ângulos dos alinhamentos adjacentes, α' e α'' da figura 5.11, impondo um limite ao deslocamento para o vértice P' (5.15).

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha'_{max} \leq 2 * \text{atan} (d_1 / R_{min}) - \alpha' \\ \alpha''_{max} \leq 2 * \text{atan} (d_2 / R_{min}) - \alpha'' \end{array} \right. \quad (5.15)$$

$$\alpha_{max} \leq \min (\alpha'_{max} , \alpha''_{max})$$

Onde α'_{\max} é o ângulo formado entre o alinhamento adjacente ao vértice A e o novo alinhamento formado pelos vértices A e P', R_{\min} corresponde ao valor mínimo do raio a implementar.

Dependendo do valor de α_{\max} , o limite de deslocamento do vértice P' pode ser inferior aos limites do corredor. Esta consideração (α_{\max}) permite garantir que posteriormente é possível desenvolver o traçado em planta de acordo com as normas, cumprindo os raios mínimos (R_{\min}) de traçado (InIR, 2010).

A cota dos novos vértices é determinada depois de conhecidas a suas localizações em planta. Considerando que a cota dos pontos extremos foi previamente definida pelo preparador do traçado ou por instâncias superiores no processo de geração de corredores, estas não são alteradas. No cálculo da cota do vértice é tida em consideração a inclinação dos segmentos para que esta se enquadre nos limites máximos impostos pelas normas de traçado, para o tipo de via em estudo.

À medida que o processo de geração de uma estrada avança, o traçado rodoviário vai sendo refinado, até se obter uma definição de traçado em alinhamentos retos com nível de detalhe adequado ao desenvolvimento do traçado em planta.

5.3.5 Traçado em planta

A partir da definição do traçado em alinhamentos retos é desenvolvido o traçado em planta, com a introdução de curvas compostas. As curvas em planta são constituídas por uma clotóide de entrada, um arco de curva circular e uma clotóide de saída. Esta sequência em termos geométricos resulta numa curva composta, como se ilustra na figura 5.12.

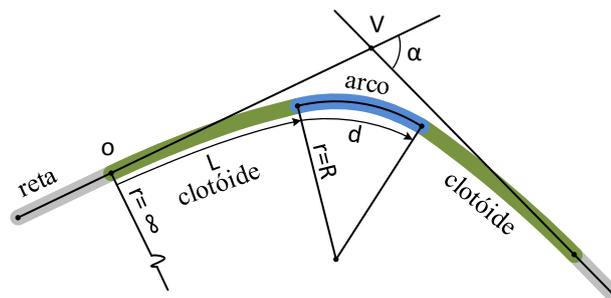


Figura 5.12 Curva composta simétrica.

Dependendo do tipo de via, existem parâmetros a nível geométrico que constam das normas de traçado e que devem ser respeitados, como por exemplo: o parâmetro A da clotóide e o raio mínimo em planta. Os valores mínimos admissíveis para estes parâmetros estão relacionados com a velocidade de base da via. Conhecido o parâmetro A, o ângulo (α) entre os alinhamentos retos (figura 5.13) e as respetivas extensões L_A e L_B , calcula-se o valor do raio (R) do arco da curva circular (5.16).

$$R = \frac{L_{seg}/2}{\tan(\alpha/2)} \quad (5.16)$$

Na equação anterior, L_{seg} corresponde à menor das extensões dos alinhamentos retos adjacentes, $\min(L_A, L_B)$.

Conhecido o raio (R) do arco da curva circular, o parâmetro (A) da clotóide e o ângulo (α) entre os dois alinhamentos retos é possível determinar os restantes elementos do desenvolvimento da clotóide (figura 5.13).

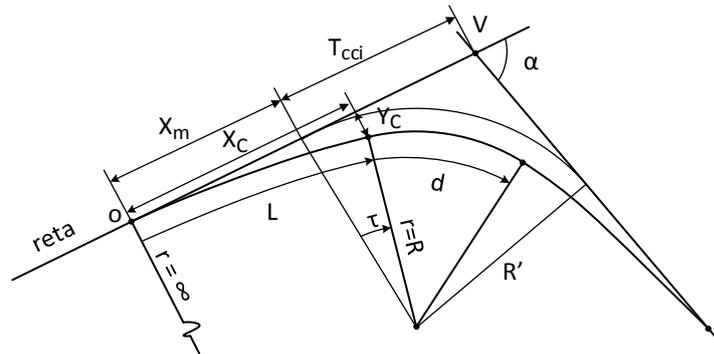


Figura 5.13 Desenvolvimento da clotóide.

Os elementos em falta são: a extensão (L) de desenvolvimento da clotóide, o ângulo da tangente no ponto final da clotóide (τ), o valor do desvio (ΔR) do raio devido à introdução da clotóide e o ponto de osculação (o) situado no fim do alinhamento reto e início da clotóide (figura 5.13). O valor do desvio (ΔR) do raio corresponde à diferença entre o raio (R') antes da introdução da clotóide e o raio (R) devido à introdução da clotóide ($\Delta R = R' - R$). Conhecido o parâmetros A e o raio R , o valor de desvio (ΔR) do raio pode ser calculado pela equação (5.17).

$$\Delta R \approx A^4 / 24R^3 \quad (5.17)$$

Para determinar o ponto de osculação (o) ainda é necessário determinar os parâmetros T_{cci} e X_m da figura 5.13. A distância T_{cci} é calculada pela equação (5.18).

$$T_{cci} = R' * \tan(\alpha/2) \quad (5.18)$$

Onde, R é o raio da curva circular, ΔR é a variação do raio com a introdução de clotóide e α o ângulo entre os dois alinhamentos. O parâmetro X_m é calculado pela equação (5.19).

$$X_m = X_c - R * \sin(\tau_{max}) \quad (5.19)$$

Onde, τ_{max} corresponde ao ângulo entre a tangente e o alinhamento reto no ponto final da clotóide ($\tau_{max} = L / 2R$).

O valor de X_c e Y_c é determinado pelo sistema de equações (5.20).

$$\begin{cases} X_c = L - (L^5/40A^4) + (L^9/3456A^8) \\ Y_c = (L^3/6A^2) - (L^7/336A^6) + (L^{11}/42240A^{10}) \end{cases} \quad (5.20)$$

Onde, L corresponde ao desenvolvimento da clotóide, e A o parâmetro da clotóide.

As variáveis X_c e Y_c correspondem ao desenvolvimento da clotóide segundo os eixos x e y , respetivamente. O valor do desenvolvimento (d) da curva circular é calculado pela equação (5.21).

$$d = R * (\alpha - 2 * \tau_{\max}) \quad (5.21)$$

Onde α é o ângulo de desvio dos alinhamentos retos, R o raio da curvatura circular e τ_{\max} corresponde ao ângulo da tangente no ponto final da clotóide.

O desenho do arco da curva circular, segundo os eixos x (M) e y (P), é determinado pelo sistema de equações 5.22.

$$\begin{cases} M = X_c + d' * \text{sen}(\theta) \\ P = Y_c + d' * \text{cos}(\theta) \end{cases} \quad (5.22)$$

Onde, θ é o ângulo de desvio no arco na extensão d' e varia entre zero e $(\alpha - 2 * \tau_{\max})$.

Com a introdução de curvas compostas entre as definições dos alinhamentos retos, o traçado em planta fica concluído, seguindo-se a definição do traçado em perfil longitudinal.

5.3.6 Traçado em perfil longitudinal

O traçado em perfil longitudinal tem como objetivo adequar a cota da via ao relevo do terreno. O perfil longitudinal deve aproximar-se o mais possível da cota do terreno, minimizando desta forma o volume de movimentos de terras e outro tipo de construções como pontes e túneis, diminuindo os custos totais de construção.

Para traçar o perfil longitudinal é necessário fazer um levantamento, com espaçamento regular, da cota do terreno sobre o eixo da via da estrada. Após conhecer a relação entre a definição do terreno e o traçado da estrada, procede-se à definição dos vértices em altimetria (v_1, v_2, v_3) como se exemplifica na figura 5.14.

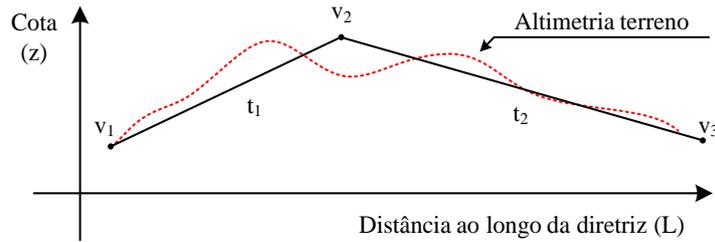


Figura 5.14 Levantamento da cota do terreno.

Os vértices em altimetria definem os alinhamentos retos em perfil longitudinal, designados em engenharia de vias por trainéis. O perfil longitudinal de uma estrada desenvolve-se com a introdução de concordâncias verticais entre as definições dos trainéis, como se ilustra na figura 5.15.

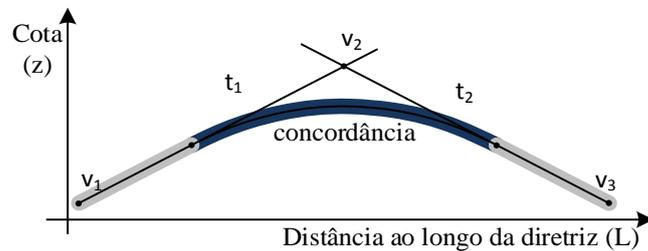


Figura 5.15 Concordância vertical.

As concordâncias verticais podem ser dos tipos côncavas ou convexas. As características geométricas destas concordâncias devem obedecer aos critérios definidos nas normas de traçado.

Os trainéis t_1 e t_2 da figura 5.15, correspondem aos alinhamentos retos em altimetria obtidos a partir da definição dos vértices v_1 , v_2 e v_3 . A inclinação i_n de um trainel (t_n) é determinada em função das cotas dos vértices (C_v) que lhe dão origem e da distância (d) sobre o eixo da via entre os respetivos vértices (5.23).

$$i_n = \frac{C_{v(n)} - C_{v(n+1)}}{d} \quad (5.23)$$

Onde, $C_{v(n)}$ e $C_{v(n+1)}$ correspondem às cotas dos vértices do trainel (t_n).

As normas de traçado definem a inclinação máxima dos trainéis em função da velocidade de base. Como exemplo, para uma autoestrada projetada para uma velocidade de 120 km/h, a inclinação máxima não deve exceder os 3%. Já no caso de uma estrada nacional projetada para uma velocidade de 60 km/h, a inclinação máxima não deve exceder os 7%.

Na aproximação da cota do vértice ao terreno é tida em consideração a inclinação do trainel, de forma a obedecer aos limites máximos recomendados pelas normas de traçado para o tipo de via em conceção.

Conhecidas as inclinações i_1 e i_2 , e as extensões L_1 e L_2 dos trainéis t_1 e t_2 , formados pelos vértices v_1 , v_2 e v_3 da figura 5.16, determina-se o valor do raio de concordância vertical (5.24).

$$R = 0.5 * L_{\min} / (i_1 - i_2) \quad (5.24)$$

Onde, L_{\min} corresponde à menor extensão dos trainéis t_1 e t_2 , $\min(L_1, L_2)$.

Após obter o valor do raio, estão definidos todos os elementos necessários para traçar a concordância vertical, definida matematicamente por uma parábola (5.25).

$$y = y_0 + (m*d - d^2/2R) \quad (5.25)$$

Como se ilustra na figura 5.16, a concordância é implementada entre os pontos T e T', numa extensão de desenvolvimento (D) sobre o eixo da via.

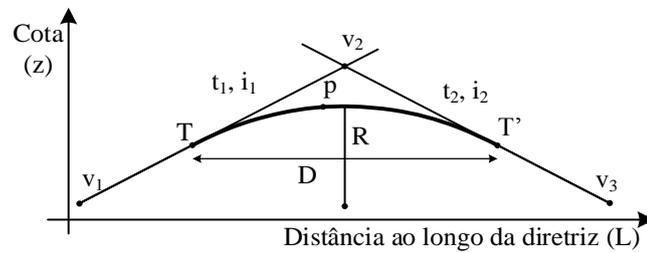


Figura 5.16 Concordância em perfil longitudinal.

A extensão de desenvolvimento (D) da concordância é obtida em função da inclinação (i_n) dos trainéis e do raio (R) da curva (5.26).

$$D = R * (i_1 - i_2) \quad (5.26)$$

O ponto T no traçado é determinado conhecendo a extensão (L_1) do trainel t_1 , e o desenvolvimento (D) da concordância (5.27).

$$T = L_1 - D/2 \quad (5.27)$$

A cota do ponto T (C_T) é determinada em função da cota do vértice inicial do trainel (C_{v1}), a inclinação do trainel (i_1) e a extensão (L_1) do trainel t_1 (5.28).

$$C_T = C_{v1} + i_1 * (L_1 - D/2) \quad (5.28)$$

A cota de um ponto p (C_p) na concordância é calculada em função da cota do ponto T (C_T), da inclinação do trainel (i_1), do raio (R) e da distância (d) percorrida ao longo da concordância (5.29).

$$C_p = C_T + (i_1 * d - d^2/2R) \quad (5.29)$$

Ao longo do traçado é determinada a cota dos pontos com o mesmo intervalo utilizado no traçado em planta. Assim, pode-se facilmente fazer a correspondência entre os pontos do traçado em planta e as cotas do perfil longitudinal, como se exemplifica na tabela 5.4.

Tabela 5.4 Piquetagem em perfil longitudinal.

Km	M	P		Km	Cota
0+000	0,0	0,0		0+000	101,321
0+025	20,0	14,9		0+025	101,329
0+050	40,0	29,9		0+050	101,336
...

O procedimento de mapear as cotas do perfil longitudinal na piquetagem do traçado em planta é semelhante ao utilizado por aplicações de engenharia de vias.

Nesta fase, a definição de traçado produzida contém informação acerca de cada troço da estrada, onde é possível identificar se este é construído sobre o terreno, em ponte ou túnel. Esta caracterização é realizada percorrendo o eixo da via, e segundo as definições apresentadas na secção 5.3.2, são classificados os respetivos troços do traçado. A definição gerada do traçado, contém a pormenorização necessária à criação do modelo tridimensional.

5.3.7 Perfil transversal

Um ambiente rodoviário pode ser constituído por três tipos de estradas: autoestrada, estrada secundária e estrada nacional. Para cada tipologia de estrada considerada, foi definido um perfil transversal tipo. As características geométricas assumidas por princípio para os perfis transversais de cada tipologia de estrada, apresentam-se na tabela 5.5.

Tabela 5.5 Características do perfil transversal tipo (InIR, 2010).

	Autoestrada (120 km/h)	Estrada secundária (90 km/h)	Estrada nacional (60 km/h)
Número de faixas	2 (uma em cada sentido de circulação)	1 (dois sentidos de circulação)	1 (dois sentidos de circulação)
Números de vias por faixa	2 (mesmo sentido de circulação)	2 (uma em cada sentido de circulação)	2 (uma em cada sentido de circulação)
Largura das vias (m)	3.75	3.75	3.5
Largura das bermas (m)	1.0 (esquerda) 3.0 (direita)	2.5	1.5

O preparador de modelos pode ajustar estas características ou especificar outras distintas. Também pode ser definido um perfil transversal para um troço específico do traçado, indexado pela posição longitudinal na estrada (secção 6.5.1). Entre diferentes definições de perfil transversal podem ser especificadas zonas de transição. As vias são definidas com pormenor, para cada troço de estrada, a partir da especificação da sinalização horizontal (secção 6.5.2).

Os eixos das vias são representados por uma lista ordenada de vértices, que representam o lugar geométrico por onde a estrada deve ser implementada. Os vértices da definição do eixo da via, para além dos três campos correspondentes às coordenadas 3D de cada ponto, podem conter ainda mais três campos, correspondentes à especificação dos ângulos de *heading*, *pitch* e *roll*. O ângulo de azimute ou *heading* representa o ângulo de rotação em torno do eixo vertical (z). O ângulo de inclinação frontal ou *pitch* representa o ângulo de rotação em torno do eixo (x). O ângulo de inclinação lateral ou *roll* (α) representa o ângulo de rotação em torno do eixo longitudinal (y), como se exemplifica na figura 5.17.

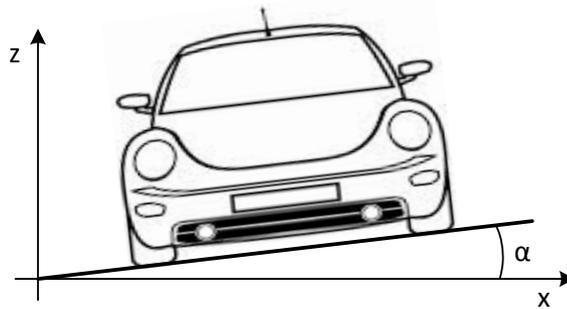


Figura 5.17 Ângulo de inclinação lateral.

No desenvolvimento do traçado de uma estrada também é considerada a sobrelevação em curva. A sobrelevação é a inclinação transversal da plataforma da via e contribui para a segurança de circulação e drenagem das águas. A sobrelevação em curva contribui para um aumento da segurança e comodidade de circulação, pois permite que parte da força centrífuga seja compensada pela força de gravidade. O ângulo de inclinação lateral *roll* é utilizado para especificar a sobrelevação, na definição do eixo da via. A variação da sobrelevação numa curva composta inicia-se ainda no troço reto, antes da clotóide de entrada, como se ilustra na figura 5.18.

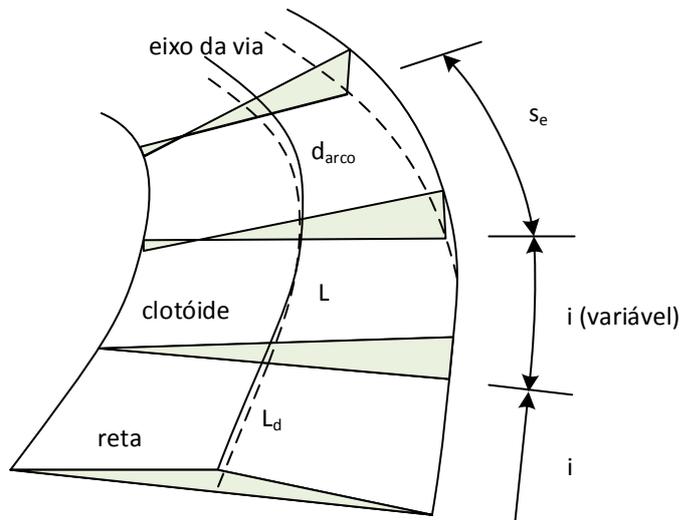


Figura 5.18 Sobrelevação em curva.

No traçado, durante a extensão L_d , existe uma variação linear da sobrelevação definida no troço reto ($i = \text{const}$) para a sobrelevação definida no início da clotóide (i variável). No cálculo da sobrelevação é necessário determinar a extensão L_d no final do troço reto onde se inicia a transição da sobrelevação, dado pela equação 5.30.

$$L_d = \frac{2L+i}{S_e-i} \quad (5.30)$$

Onde, L é a extensão da clotóide, i a sobrelevação em reta (em %) e S_e a sobrelevação em curva circular (em %).

Durante o desenvolvimento da clotóide é completada a transição gradual da sobrelevação em reta (i) para a sobrelevação do arco de curvatura (S_e). Na extensão do arco a sobrelevação mantém-se constante com o valor de S_e .

5.4 Estrada e meio envolvente

O módulo *Road Enviro*, é responsável pela definição da sinalização rodoviária e pela edição do modelo de terreno em função de cada estrada da rede. Nesta secção descrevem-se os métodos propostos para a colocação da sinalização e edição do modelo de terreno.

5.4.1 Sinalização

O ambiente de uma estrada, para além do modelo da plataforma da via, deve incluir também a sinalização horizontal e vertical, entre outros objetos típicos.

A sinalização horizontal é colocada no modelo visual por marcas rodoviárias longitudinais no pavimento, definindo assim as vias de circulação em cada troço de estrada. Estas marcas podem ser contínuas, descontínuas ou ambas. A especificação da

sinalização horizontal devem obedecer às normas de marcas rodoviárias estabelecidas (InIR, 2015a). Em função do tipo de via (autoestrada, secundária ou nacional) é gerada procedimentalmente uma definição de sinalização horizontal, que mais tarde o preparador do modelo pode consultar e editar.

Na definição da sinalização horizontal, para estradas de duas vias, com sentidos de circulação opostos, devem ser identificadas automaticamente as zonas de marcação com linha longitudinal contínua e com linha longitudinal descontínua. A marcação longitudinal é realizada, percorrendo o eixo da via sendo identificadas as extensões de estrada que não cumprem a extensão mínima (tempo) para efetuar a manobra de ultrapassagem (tabela 3.2 da secção 3.5.1).

Em função da velocidade de base da via rodoviária em estudo é gerada uma definição de sinalização vertical, como por exemplo a sinalização de limite de velocidade a colocar ao longo do traçado da estrada (InIR, 2010). Os critérios para a colocação da sinalização vertical, bem como o seu dimensionamento devem estar de acordo com as normas e o regulamento de sinalização de trânsito (InIR, 2015b; RST, 2011). A colocação de um modelo de sinal no ambiente rodoviário requer apenas a especificação de dois parâmetros, distância transversal relativamente ao eixo da via e a distância longitudinal relativamente ao início da estrada, como se ilustra na figura 5.19.

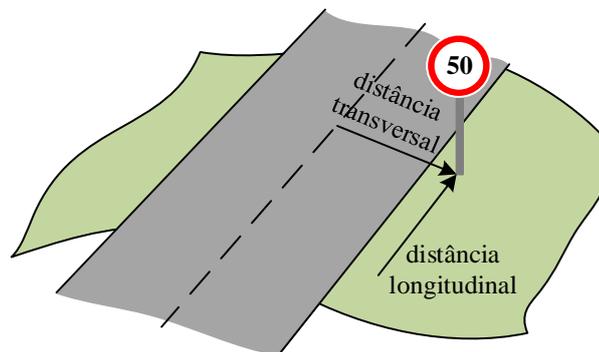


Figura 5.19 Colocação da sinalização vertical.

Na colocação da sinalização vertical devem também ser identificadas as curvas com raios reduzidos, que possam levantar questões de segurança e proceder à colocação procedimental de sinalização de aviso de perigo. Efetuando uma análise do valor dos raios e da sua sequência ao longo do traçado, pode-se determinar onde deve ser colocada a sinalização de perigo (figura 3.3 da secção 3.5.1).

Devem ser identificadas as interseções de estradas, como por exemplo cruzamentos e entroncamentos, de forma a proceder à colocação de sinalização horizontal e vertical adequada.

Para a definição da sinalização horizontal e vertical foi concebido um formato próprio (secção 6.5.2). Este formato permite a consulta e edição de forma fácil, da definição gerada procedimentalmente, pelo preparador do modelo.

O ambiente de uma estrada, para além da sinalização horizontal e vertical, deve ser ainda enriquecido com inúmeros objetos envolventes. À semelhança da sinalização vertical, foi concebido um formato próprio para a definição de outros objetos que se pretendam inserir no ambiente (secção 6.5.3), como modelos tridimensionais de postes de iluminação, guardas de segurança, árvores, muros entre outros.

5.4.2 Edição do modelo de terreno

Na geração de um ambiente rodoviário, o modelo de terreno deve ser editado em função da rede de estradas. Um método eficiente de realizar a alteração da altimetria do terreno consistem em, para cada ponto do terreno, verificar se a cota deste é influenciada pela passagem das estradas. Uma forma de otimizar o processo de cálculo para todos os pontos, é utilizar uma hierarquia espacial do terreno, que possibilita eliminar zonas do terreno afastadas que não são afetadas pela passagem das estradas.

Assim, para cada ponto do terreno é calculada a distância mínima a todas as estradas da rede e de acordo com esta distância é determinado se o valor da coordenada z necessita de ser alterado. Como se pode ver no exemplo da figura 5.20, a distância do ponto do terreno ao eixo da via (D_p) é menor que a largura da via (D_v). Neste caso, considerando o ângulo de sobrelevação (α), resulta em que o ponto do terreno inicialmente com posição em P_o , é deslocado para a posição P_f .

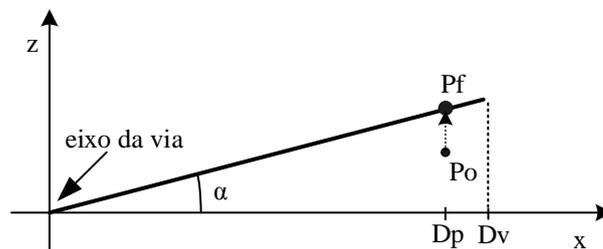


Figura 5.20 Cota do terreno sob a via.

Na zona da plataforma da via, as cotas do terreno ficam ao mesmo nível que a cota da estrada. Se a distância do ponto do terreno ao eixo da via (D_p), for menor ou igual que a largura da via (D_v), considerando a especificação de sobrelevação, então a cota do ponto do terreno é determinada pela equação (5.31).

$$Z_{\text{ponto}} = Z_{\text{eixodavia}} + D_p * \tan(\alpha) \quad (5.31)$$

Quando a distância do ponto do terreno ao eixo da via é superior à largura da via, então são consideradas as definições de talude de escavação e de talude de aterro, na avaliação da necessidade de alterar a cota do terreno. Na conceção de uma estrada é comum utilizar diferentes inclinações para a especificação dos taludes. Essas inclinações variam dependendo da morfologia do terreno, mais acentuada em terrenos rochosos e menos

acentuados em terrenos macios. A relação por defeito utilizada neste trabalho para definir o talude de aterro e o talude de escavação é de, $\tan\beta = 1/1.5$ (figura 5.21).

Independentemente dos valores parametrizados por defeito o preparador do modelo pode especificar funções diferentes para os taludes de escavação e para os taludes de aterro. A cota do ponto do terreno não é alterada se esta estiver posicionada entre as definições dos taludes, como por exemplo para o ponto P_3 da figura 5.21.

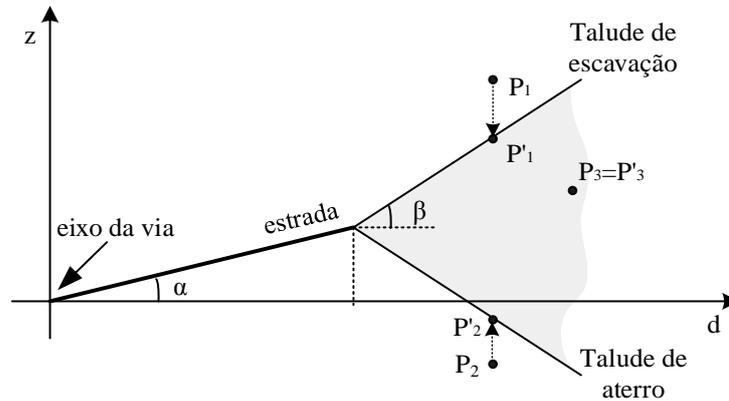


Figura 5.21 Cota do terreno com taludes.

Na figura 5.21, estão representadas duas situações em que a cota do terreno é alterada. Para o ponto P_1 , existe uma alteração de cota, deslocando o ponto da posição original para a posição P'_1 , dando origem a um talude de escavação. Para o ponto P_2 , existe uma alteração da cota, deslocando o ponto para a posição P'_2 , originando um talude de aterro. Para determinar se a cota deve ser alterada, são calculados dois valores possíveis para a cota do ponto do terreno, um para o caso do talude de escavação e outro para o caso do talude de aterro. A cota do ponto do terreno para o caso do talude de escavação é dada pela equação (5.32).

$$Z_{\text{escavação}} = Z_{\text{eixodavía}} + D_v * \tan(\alpha) + \tan(\beta) * (D_p - D_v) \quad (5.32)$$

Se a cota atual do ponto do terreno for superior ao valor calculado para o talude de escavação, então a cota é atualizada com o valor do talude de escavação (P'_1 da figura 5.21). A cota do ponto do terreno para o caso do talude de aterro é dada pela equação (5.33).

$$Z_{\text{aterro}} = Z_{\text{eixodavía}} + D_v * \tan(\alpha) - \tan(\beta) * (D_p - D_v) \quad (5.33)$$

Se a cota atual do ponto do terreno for inferior ao valor calculado para o talude de aterro, então a cota é atualizada para o valor do talude de aterro (P'_2 da figura 5.21).

Num terreno em que o verde é a cor predominante, correspondente à vegetação local, é comum verificar-se uma alteração da cor natural do terreno quando se efetua uma intervenção com movimentação de terras. Tipicamente, numa zona de estrada em obras,

a cor pode transitar entre o verde da vegetação natural e o castanho correspondente à terra movimentada. Na edição do modelo do terreno é guardada informação das áreas afetadas pela passagem da estrada, permitindo a visualização com um aspeto diferente.

5.5 Modelo semântico

Durante a criação do ambiente rodoviário é produzida uma descrição semântica de todo o modelo gerado. O modelo semântico de um ambiente rodoviário é uma descrição de alto nível de caracterização de todo o modelo. Esta descrição é fundamental em simuladores de condução para fins científicos, não só para a produção de relatórios mas também para a parametrização de atores, parametrização de eventos de tráfego e consulta por outros sistemas.

É conhecido que diversos fatores contribuem para o realismo e a imersividade das experiências de simulação de condução, como o modelo físico de simulação do carro conduzido, o realismo do traçado e o enriquecimento dos ambientes rodoviários com elementos dinâmicos. É também reconhecido que a inclusão de atores e a parametrização de eventos tráfego torna a experiência de condução mais imersiva e realista (Ostadabbas, 2011).

Tipicamente, em experiências de simulação de condução pretende-se estudar o comportamento dos condutores em determinadas circunstâncias específicas. Para a implementação deste tipo de experiências é normalmente requerida a colocação de outros veículos e a especificação de eventos de tráfego precisos.

Para a colocação de atores e especificação de eventos de tráfego, outros níveis de informação devem coexistir, para além do modelo visual. O modelo semântico deve incluir a definição do eixo da via, informação sobre o número e a largura das faixas de rodagem, a largura das bermas, o número e a largura das vias e a definição da sinalização rodoviária, horizontal e vertical, limite legal de velocidade em cada troço de estrada, entre outros elementos.

A representação do eixo da via através de listas ordenadas de vértices com diferentes níveis de detalhe, como referido na secção 5.3.7, permite obter facilmente uma base de dados que contém a informação vetorial requerida sobre o eixo da estrada. Este tipo de informação é fundamental para consulta durante a simulação de condução. Durante o funcionamento do simulador de condução, as representações dos eixos das vias são exaustivamente consultadas. Alguns dos processamentos típicos mais pesados sobre as informações dos eixos das vias, são realizados várias vezes por cada ciclo de simulação, pelo que devem ser otimizados. A determinação da distância de um ponto qualquer no espaço ao eixo da via é realizada sempre que se pretende, por exemplo, conhecer a posição de um veículo relativamente à estrada. Com base na descrição semântica da estrada também é possível determinar a posição, orientação, entre outros fatores, de um

veículo relativamente à via. É possível por exemplo, determinar o tempo para cruzar a linha de sinalização (guia lateral ou separadora central).

Adicionalmente, com base na definição semântica do modelo gerado e recorrendo a ferramentas desenvolvidas no âmbito da preparação procedimental de ambientes rodoviários, é possível povoar um ambiente rodoviário com atores de forma rápida e eficiente.

A definição semântica de um modelo, obtida no final do processo integrado de preparação de ambientes rodoviários é composta pelas seguintes definições:

- Definição da rede;
- Definições do traçado em alinhamentos retos, com diferentes níveis de detalhe;
- Definição do eixo da via, em planta e em perfil longitudinal;
- Definição do perfil transversal da estrada;
- Definição da sinalização;
- Definição do modelo de terreno.

Este conjunto de informações é obtido dos diferentes módulos que constituem o processo integrado de modelação de ambientes.

Associado a cada nó, pode-se encontrar informação como: localização, nome, população e tipo (secção 5.1). Na geração da rede, é produzida uma definição de ligações entre pares de nós, como referido na secção 5.2.

Na geração do traçado, são produzidas diferentes definições em alinhamentos retos correspondentes a cada nível de detalhe (corredores), como se exemplifica na tabela 5.6.

Tabela 5.6 Definição dos corredores.

Corredor	Vértices
Largura (1km)	1
Extensão	2
Volumes de movimentos terras	...
Áreas afetadas pelas condicionantes	n
Extensões em ponte e túnel	
	1
Largura (5km)	2
...	...
	n
...	...

No final da geração do traçado dos corredores, obtém-se uma definição em alinhamentos retos com o detalhe adequado ao desenvolvimento do traçado em planta em perfil longitudinal. Relativa a cada estrada é gerada uma definição da estrada, permitindo

consulta do nome, da tipologia, da extensão, da velocidade base, entre outros elementos (tabela 5.7).

Tabela 5.7 Definição da estrada.

	Descrição
Nome	Nome da estrada
Nós extremos	Identificação dos nós extremos da ligação
Tipo	Tipologia da ligação: AE, ES, EN.
Largura da faixa	Largura da plataforma da estrada (m)
Velocidade base	Velocidade base/limite da estrada (km/h)
Tipo de pavimento	Betuminoso, pedra, etc.
Extensão	Extensão da estrada (m)

No desenvolvimento do traçado em planta é gerada uma definição que caracteriza o traçado em planta de cada estrada, por uma sequência de retas e curvas. Para cada reta e curva pode ser consultada, por exemplo, a posição longitudinal de início e fim(tabela 5.8).

Tabela 5.8 Definição do traçado em planta.

Nome da estrada	Reta (Início, fim, extensão)	
	Curva	Clotóide (Parâmetro, extensão, início, fim)
Arco (Raio, início, fim, extensão)		
Clotóide (Parâmetro, extensão, início, fim)		
	Reta (Início, fim, extensão)	
	...	

No desenvolvimento do traçado em perfil longitudinal é gerada uma definição que caracteriza o traçado por uma sequência de trainéis e concordâncias, como se exemplifica na tabela 5.9.

Tabela 5.9 Definição do traçado em perfil longitudinal.

Nome da estrada	Trainel (Início, fim, extensão, tipo: subir/descer)
	Concordância (Raio, desenvolvimento, tipo: concava/convexa)
	Trainel (Início, fim, extensão, tipo: subir/descer)
	Concordância (Raio, desenvolvimento, tipo: concava/convexa)
	Trainel (Início, fim, extensão, tipo: subir/descer)
	...

Na definição da sinalização horizontal é gerada uma lista de linha longitudinais (separadores), permitindo delimitar a largura da faixa de rodagem e as vias em cada

faixa. Com base nesta informação, por exemplo, é possível determinar, por exemplo, se um veículo se encontra numa zona de proibição de ultrapassagem, em excesso de velocidade, entre outros (tabela 5.10).

Tabela 5.10 Definição da sinalização horizontal.

	Descrição
Id Separador	(esq.) -n, ..., -2, -1, 0 (eixo), 1, 2, ..., n (dir.)
Distância ao eixo	Distância ao eixo da via (m)
Tipo	Linha contínua ou descontínua
Cor	Cor da linha (branca, amarela)
Largura	Largura da linha (m)
Relação espaço/traço	Na linha descontínua, relação espaço / traço
Início	Posição longitudinal de início de representação da linha (m)
Fim	Posição longitudinal de fim de representação da linha (m)
Limite de Velocidade	Limite de velocidade da via definida pela linha (km/h)

Na definição da sinalização vertical é gerada uma lista de sinais, indexada pela posição longitudinal. Esta definição permite por exemplo, identificar em cada troço de estrada a velocidade permitida imposta pela sinalização vertical (tabela 5.11).

Tabela 5.11 Definição de sinalização vertical.

	Descrição
Nome	Nome do sinal
Tipo	Tipo de sinal: Obrigatoriedade, proibição, informação)
Limite velocidade	Em sinais de limite de velocidade (km/h)
Posição longitudinal	Posição longitudinal na estrada (m)
Distância ao eixo	Posição lateral (m)
Orientação	Orientação do sinal (<i>heading</i> , <i>pitch</i> e <i>roll</i>)
Modelo	Nome do modelo do sinal

A definição do limite de velocidade é hierárquica, prevalecendo a imposição da sinalização vertical sobre o valor especificado por cada via, e esta sobre a velocidade base da estrada.

Um ambiente rodoviário é constituído por inúmeros objetos envolventes. Também pode ser criada uma definição de objetos típicos destes ambientes. Para esta especificação é gerada uma lista com a definição dos objetos (tabela 5.12).

Tabela 5.12 Definição de objetos.

	Descrição
Nome	Nome do objeto
Tipo de colocação	Simple ou repetitiva
Posição longitudinal	Posição longitudinal na estrada (m)
Distância ao eixo	Posição lateral (m)
Orientação	Orientação do objeto (<i>heading</i> , <i>pitch</i> e <i>roll</i>)
Modelo	Nome do modelo do objeto

Para a definição de objetos que se repetem ao longo do traçado, à informação anterior apresentada na tabela 5.12, é acrescentado o início/fim de colocação e intervalo de repetição, como se descreve na secção 6.5.3.

Após obter o traçado final da estrada é realizada uma avaliação entre a cota da estrada e a cota do terreno, identificando os troços onde existe movimentação de terras. No final desta avaliação é produzida uma lista que caracteriza cada aterro e escavação ao longo do traçado (tabela 5.13).

Tabela 5.13 Movimentações de terras.

Escavação		Aterro	
Início	Posição longitudinal (m)	Início	Posição longitudinal (m)
Extensão	Extensão de escavação (m)	Extensão	Extensão de escavação (m)
Volume	Volume de terras (m ³)	Volume	Volume de terras (m ³)

Nesta avaliação, também são identificados os troços da via que serão construídos em ponte ou túnel, sendo produzida uma lista correspondente (tabela 5.14).

Tabela 5.14 Pontes e túneis.

Ponte		Túnel	
Nome	Nome da ponte	Nome	Nome do túnel
Início	Posição longitudinal de início (m)	Início	Posição longitudinal de início (m)
Extensão	Extensão em ponte (m)	Extensão	Extensão em túnel (m)

Como referido anteriormente a definição semântica gerada por cada módulo ao longo do processo automático de criação de um ambiente rodoviário pode ser consultada e editada pelo preparador do modelo. Esta possibilidade de interação é fundamental para cumprir os requisitos específicos de cada trabalho experimental, na geração procedimental de ambientes.

Adicionalmente a definição semântica gerada também pode ser exportada para outros sistemas, que necessitem de consultar as definições do ambiente rodoviário. Como exemplo, sistemas de auxílio à condução gerando avisos do limite legal de velocidade permitida num determinado troço de uma estrada.

A definição semântica e dados da simulação também podem ser disponibilizados em tempo real para outros sistemas, como por exemplo, sistemas de auxílio à condução com vista à economia de combustível, sistemas de ensino da tarefa de condução permitindo o controlo externo de eventos, entre outras aplicações.

5.6 Modelo geométrico

A obtenção de imagens num simulador de condução requer um modelo geométrico de um ambiente virtual completo, composto pelos modelos das estradas e do terreno, entre outros elementos típicos. A geração dos modelos geométricos das estradas, da sinalização e do terreno é realizada pelo módulo *Models Generator*. Os modelos geométricos são gerados a partir das definições produzidas pelos módulos constituintes do processo integrado de geração de ambientes, como se ilustra na figura 5.22.

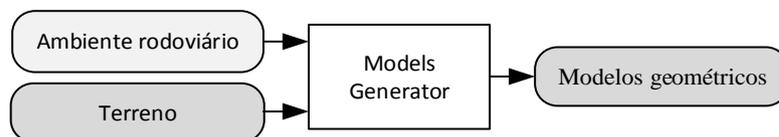


Figura 5.22 Geração dos modelos geométricos.

À semelhança do modelo semântico do ambiente rodoviário, os modelos geométricos criados também podem ser exportados para outros sistemas.

5.6.1 Modelo da estrada

Por analogia a uma estrada real em que esta é construída pela extrusão do perfil transversal ao longo do seu percurso, para representar graficamente um modelo de uma via, utiliza-se uma tira de triângulos interligados entre si, como se ilustra na figura 5.23.

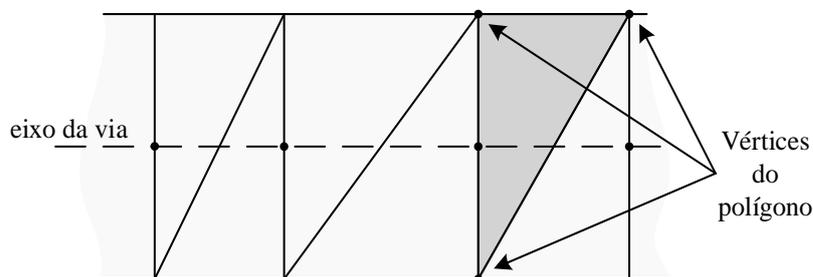


Figura 5.23 Tira de triângulos.

Em situações de reta, não existe a necessidade de ter uma elevada concentração de polígonos para visualizar o modelo da via. Para minimizar o número de polígonos utilizados na representação da estrada, é reduzido o número de polígonos gerados em reta relativamente ao utilizado em zonas de curva, utilizando um passo adaptativo

(Bayarri, 1998). Esta simplificação é realizada analisando o ângulo de desvio entre dois segmentos retos consecutivos, suprimindo vértices da definição do eixo da via, caso o desvio seja inferior ao parametrizado por defeito. Para a criação dos modelos geométricos das estradas, são também exploradas as técnicas desenvolvidas em trabalhos anteriores (Campos, 2007b).

O método concebido para a geração do modelo poligonal da via é idêntico ao utilizado em terreno real para a construção da estrada. O modelo da estrada é construído percorrendo o eixo da via e para cada vértice, são traçadas perpendiculares ao eixo. Com a informação do perfil transversal e utilizando cálculo vetorial determinam-se os vértices dos polígonos que compõem a via (Lagoa, 2003). Na figura 5.24, ilustra-se o cálculo dos vértices dos polígonos que compõem a via.

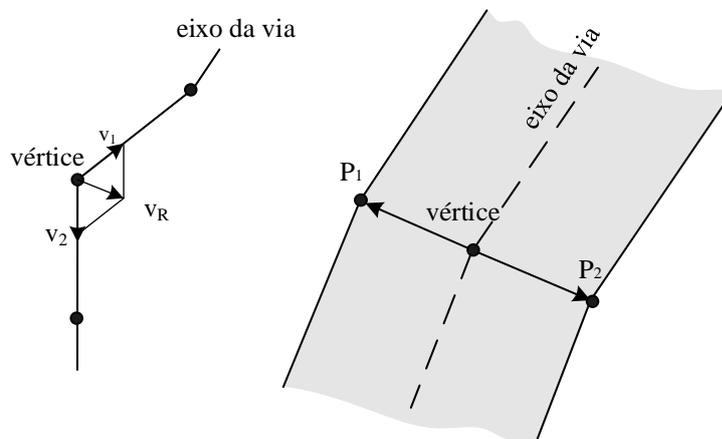


Figura 5.24 Cálculo dos Vértices dos polígonos da via.

Como se pode observar na figura 5.24, o vetor resultante (v_R) da soma dos vetores v_1 e v_2 , permite determinar a posição em planta dos vértices P_1 e P_2 . Para determinar a cota dos vértices P_1 e P_2 , é considerado o ângulo de sobrelevação da via. Para cada vértice do eixo da via, o vetor resultante (v_R) passa a ter uma orientação considerando a sobrelevação da via.

A partir da classificação obtida na geração do traçado (secção 5.3.6), são nesta fase integrados os diferentes elementos geométricos, como por exemplo, pontes e túneis. Essa tarefa é realizada percorrendo o eixo da via e em função da tipologia de cada troço, são instanciados os respetivos modelos de pontes e túneis.

5.6.2 Sinalização

À semelhança do modelo da estrada o modelo da sinalização horizontal será representado por uma tira de polígonos ao longo da estrada. A obtenção dos polígonos da linha longitudinal é efetuada através de um método semelhante ao utilizado na construção do modelo poligonal da via. Este método implica percorrer o eixo da via e

para cada vértice da definição do traçado, calcular os vértices dos polígonos que formam a linha. No caso da linha descontínua é gerado um polígono retangular para cada traço. No sentido de otimizar a detecção de visibilidade pelo sistema de síntese de imagem, os modelos de sinalização horizontal são organizados hierarquicamente com o modelo da estrada, utilizando *layers*. Os *layers* são utilizados para definir prioridades de representação, identificando qual o objeto que se sobrepõe relativamente a outro, no processo de síntese de imagem. Em sistemas de visualização em tempo real, o uso de *layers*, aumenta significativamente a qualidade da simulação. Ao definir que a camada da sinalização horizontal se sobrepõe ao modelo da via, consegue-se diminuir o efeito de *aliasing*, obtendo-se uma representação de melhor qualidade.

A sinalização vertical é colocada no ambiente rodoviário instanciando modelos de sinais rodoviários pré-modelados. Foi criada uma base de dados de sinais verticais de diferentes tipologias, informação, perigo, proibição, entre outros. O método de criação de novos sinais apenas requer a indicação do modelo tridimensional e do material a aplicar na superfície do sinal. Os modelos tridimensionais foram construídos com dimensões correspondentes as definidas nas normas de sinalização vertical para cada tipo de via (InIR, 2015b). O formato de especificação descrito na secção 6.5.2, possibilita a povoação de um ambiente rodoviário com sinalização de forma rápida e permite que o preparador do modelo possa consultar e editar a definição gerada automaticamente, impondo os requisitos específicos de cada ensaio experimental.

5.6.3 Modelo do terreno

A visualização de terrenos de grandes dimensões pode sobrecarregar até os sistemas de síntese de imagem mais poderosos. É portanto necessário otimizar o modelo do terreno de forma a não comprometer as taxas de refrescamento da imagem. Uma forma de otimização consiste em simplificar o modelo de terreno, eliminando polígonos que se considerem de pouca importância. A simplificação do modelo de terreno aumenta as prestações dos sistemas de síntese de imagem, uma vez que permite uma diminuição do número total de polígonos tratados na geração da imagem.

Uma técnica de otimização muito utilizada consiste em obter mais do que uma definição do mesmo modelo do terreno através de simplificações sucessivas. O modelo do terreno original permite uma visualização com o máximo detalhe disponível e cada modelo simplificado corresponde a um nível de detalhe inferior. Na visualização, estes modelos associados a técnicas de seleção automática de nível de detalhe (*Level of Detail, LOD*) permitem obter ótimos resultados. Para o caso de terrenos definidos por mapa de elevação, como os que se utilizam neste trabalho, estes modelos simplificados podem ser obtidos através da redução uniforme da malha de pontos, como explorado em (Campos, 2007b).

Modelos de terrenos de grandes dimensões devem também ser organizados hierarquicamente de acordo com a localização espacial. A hierarquização do terreno adotada consiste em dividir o modelo global em células de menor dimensão. Depois de obter todas as células, estas são organizadas sucessivamente em conjuntos.

A variação do nível de detalhe aliada à organização espacial dos modelos da estrada e do terreno na geração dos modelos visuais, permite a geração de imagens adequadas à realização de experiências científicas em simulador de condução

Sumário

Neste capítulo foram referidos os aspetos relevantes na conceção de um método integrado de preparação procedimental de ambientes rodoviários adequados para simulação de condução. O capítulo iniciou-se com a descrição dos módulos de geração de nós e da rede topológica. Inspirado nos procedimentos utilizados em engenharia de vias, descreveu-se a abordagem adotada na conceção do método de geração de traçados de estradas, em planta e em perfil longitudinal. A colocação da sinalização e a edição do modelo de terreno em função da rede de estradas foi também abordada neste capítulo. Uma das principais características do método proposto é a possibilidade de interação do preparador do modelo em qualquer etapa do processo. Esta possibilidade de interação é realizada através da edição das definições geradas por cada um dos módulos do processo integrado. Por último foram referidas as abordagens adotadas na geração dos modelos geométricos das estradas, da sinalização horizontal e do terreno.

No capítulo seguinte são apresentados os aspetos relacionados com a implementação de um protótipo para a geração procedimental de ambientes rodoviários.

Implementação

Neste capítulo é descrita a implementação de um protótipo funcional, em C++, que aplica o método proposto para a geração procedimental de ambientes rodoviários. São apresentados os aspetos relevantes na implementação dos diferentes módulos que integram o processo automatizado de preparação de ambientes, como se ilustra na figura 6.1.

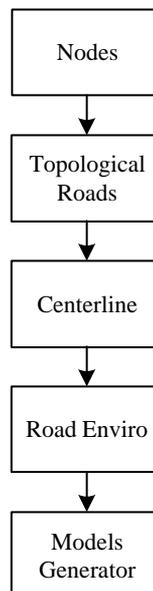


Figura 6.1 Arquitetura geral das implementações.

O capítulo começa pela descrição da implementação do módulo de geração de nós de ligação e sua organização por tipologia. A seguir descreve-se a implementação do módulo de geração da definição topológica da rede rodoviária, onde se apresenta a aplicação interativa desenvolvida. Em seguida, descreve-se o módulo corresponde à geração do traçado rodoviário de estradas em diferentes fases (corredores, traçado em planta e em perfil longitudinal).

A definição da sinalização horizontal e vertical, definição de outros objetos típicos de ambientes rodoviários é realizada pelo módulo *Road Enviro*. A edição do modelo de terreno é também tratada por este módulo, adequando o terreno à rede de estradas gerada.

A seguir é descrita a estrutura de dados concebida para a preparação de modelos de ambientes de simulação. Esta organização, permite que o preparador de ambientes possa interagir nas definições geradas por cada um dos módulos, de forma fácil e intuitiva.

Por último é descrito o módulo de geração dos modelos geométricos de ambientes rodoviários, compostos pelos modelos das estradas, modelos de sinalização e pelos modelos de terrenos.

Os parâmetros de configuração definidos por defeito, como por exemplo: índice de classificação de nós por tipologia, custos de construção, custos de zonas classificadas, entre outros, são carregados para a aplicação a partir de ficheiro. Esta característica permite guardar as configurações atuais, definidas pelo preparador do modelo, para utilizações futuras.

6.1 Geração dos nós

O processo de geração de um ambiente rede inicia-se pela definição dos nós de ligação sobre uma área de terreno. Numa primeira aproximação, o módulo de geração de nós considera uma definição simplificada do terreno, sem a definição de zonas costeiras, cursos de água e respetivas condicionantes. Sobre o modelo de terreno é realizada uma distribuição dos nós de forma aleatória.

Como referido na secção 5.1, a cada nó, além das coordenadas da sua localização é associado um fator de importância. No protótipo implementado o fator de importância corresponde à população associada a cada nó. O fator de importância (população) permite organizar os nós por tipologia e criar os diferentes tipos de redes rodoviárias. Definiram-se 3 tipos de nós de ligação: cidade (preto), vila (vermelho) e aldeia (laranja), como se ilustra na figura 6.2.

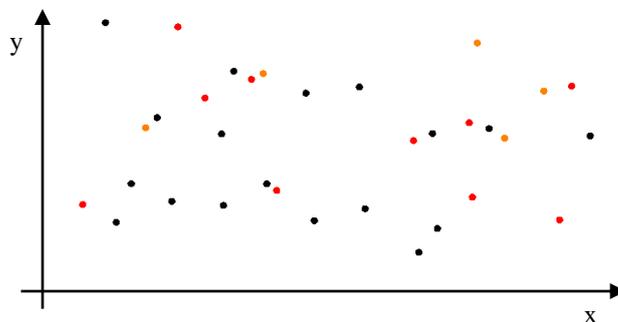


Figura 6.2 Geração de nós de ligação.

A partir da organização dos nós de ligação por tipologia, são criadas as diferentes redes de estradas: autoestrada, secundária e nacional.

6.2 Geração da rede topológica

O processo de geração da definição topológica da rede de estradas inicia-se pelos nós do tipo cidade, criando a rede de autoestradas. A partir da definição da rede de autoestradas gerada, são tratados os nós do tipo vila, definindo a rede de estradas secundárias. Nesta fase, a definição da rede é constituída por ligações do tipo autoestradas e por ligações do tipo estrada secundária. Por último, são tratados os nós do tipo aldeia, definindo a rede de estradas nacionais.

Na análise da rede, a decisão de manter uma determinada ligação, é tomada tendo em conta a comparação entre o custo de construção e o respetivo benefício. O benefício oferecido por uma ligação reflete a economia prevista pela sua utilização, em termos de tempo e distância percorrida, face ao recurso de um percurso alternativo (secção 5.2). No cálculo do benefício, a população associada a cada nó é utilizada para estimar o tráfego previsto numa ligação. A ligação é mantida, na definição da rede, se o benefício calculado for superior ao custo de construção estimado.

Neste processo de geração da rede rodoviária é criada uma definição topológica que estabelece as ligações entre pares de nós. Esta definição é gravada em ficheiro num formato próprio, que pode depois ser consultada pelo preparador do modelo (secção 7.1).

Desenvolveu-se uma aplicação interativa para testar e validar o método concebido para a definição da rede topológica. Esta aplicação foi desenvolvida em C++, utilizando *Windows Forms* para implementar os elementos de interação e a biblioteca *OpenGL* para a componente de visualização gráfica (figura 6.3).

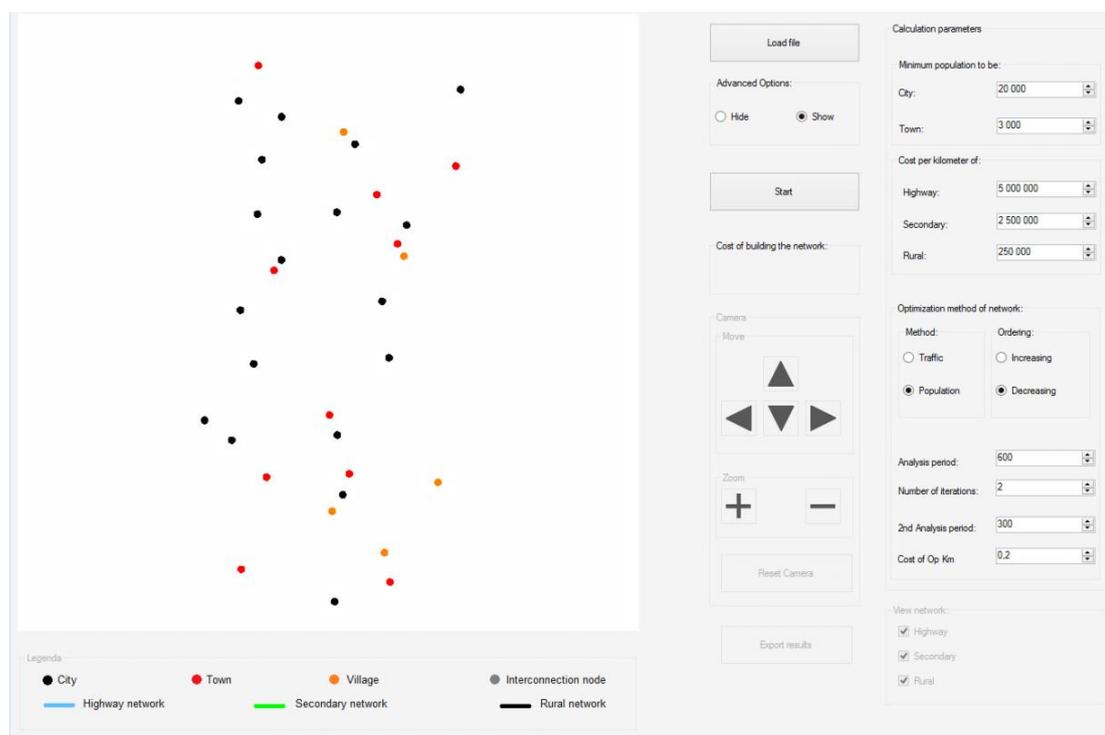


Figura 6.3 Aplicação interativa de geração da rede.

A aplicação desenvolvida permite controlar, todos os parâmetros relacionados com a geração da rede. Simultaneamente, é apresentada numa janela a rede topológica gerada, permitindo a interação do utilizador com o resultado obtido. No painel de interação à direita, o utilizador por exemplo, pode alterar o valor dos parâmetros utilizados na classificação dos nós por tipo e visualizar a sua distribuição na janela à esquerda. A alteração do índice de classificação dos nós por tipo pode resultar numa redefinição tipológica dos nós e assim numa redefinição da rede.

É utilizada uma definição inicial dos nós de ligação obtida de um ficheiro de texto, que o preparador do modelo pode facilmente consultar e editar. Na aplicação desenvolvida, o ficheiro de entrada pode ser selecionado através do botão *Load File*, no painel da direita da figura 6.3. O preparador da definição topológica da rede pode editar os parâmetros de controlo, definidos por defeito, tais como: índices de classificação de nós por tipologia, custo de construção, custo de operação e método de ordenação de nós.

6.3 Geração do traçado

A geração de um traçado inicia-se pela definição da ligação, sendo realizada em diferentes níveis. Em cada nível é gerada uma definição de traçado, designada por corredor. O processo de geração de corredores foi implementado recorrendo à aplicação recursiva do processamento de um nível de detalhe. Após a escolha de uma alternativa de traçado avança-se para o nível de detalhe seguinte, como se ilustra na figura 6.4.

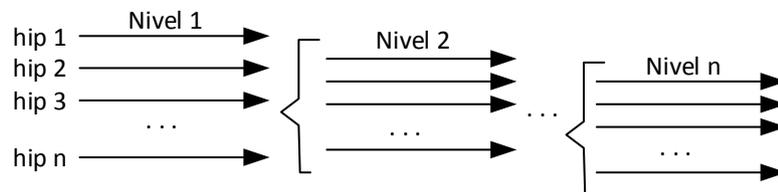


Figura 6.4 Geração do traçado por níveis.

Em cada nível são geradas diferentes alternativas de traçado para um novo corredor. Para cada alternativa de traçado é avaliada a sua relação com o terreno e respetivas condicionantes. A escolha da melhor hipótese em cada nível é realizada recorrendo a uma função de custo que avalia os diferentes indicadores apresentados na secção 5.3.2. Na implementação atual, as condicionantes do tipo água, zona florestal, reservas ecológicas, zonas agrícolas, entre outras, são representadas por imagem, em tons de cinzento, no formato *tiff*. O traçado da estrada é analisado sobre cada condicionante, previamente carregada para memória, indexada por linha e coluna. No caso da condicionante água, esta também é consultada para avaliar a necessidade de construção do traçado em ponte.

O projeto de uma via rodoviária deve ter em consideração o índice de utilização potencial (tráfego), devendo uma via prevista para uma utilização mais intensa ter

características geométricas que potenciem um maior conforto para os utilizadores e um melhor escoamento do tráfego (nível de serviço). Uma estrada com boas características geométricas poderá acarretar maiores custos de construção, mas em contrapartida, terá um menor custo de utilização e uma maior comodidade para os condutores. No método apresentado, a geração de um traçado de uma estrada tem em consideração o potencial índice de utilização (secção 5.2).

No final de avaliadas individualmente todas as hipóteses é escolhida a que apresentar um menor custo total. O resultado produzido em cada nível corresponde a um corredor com uma determinada largura, definida na tabela 5.3 da secção 5.3.3.

Do processo de geração de corredores resulta uma definição do traçado em alinhamentos retos, seguindo o desenvolvimento do traçado em planta e em perfil longitudinal

6.3.3 Desenvolvimento do traçado em planta

O traçado em planta tem como principal objetivo a introdução de curvas entre os alinhamentos retos resultantes do processo iterativo de geração de corredores. É nesta fase que se define o traçado final da via rodoviária em planta, com o pormenor necessário à geração do modelo visual. O traçado em planta vai definir o eixo da via de uma estrada por uma sequência de retas, arcos e clotóides, como descrito na secção 5.3.5.

Uma clotóide tem como função manter a continuidade da 1.^a derivada no traçado de uma via rodoviária, de forma a permitir a transição gradual da variação da aceleração centrífuga entre o troço reto e a curva circular.

No desenvolvimento do traçado em planta de uma estrada começa-se por determinar a extensão e o ângulo de desvio entre os alinhamentos retos, resultantes do processo de geração de corredores. Os parâmetros de configuração por defeito para cada tipologia de estrada, como por exemplo, raio mínimo da curva, parâmetro da clotóide, entre outros, são carregado a partir de ficheiro.

Em função da velocidade de base da via, por aproximação, nesta implementação fixou-se o valor do parâmetro (A) da clotóide e a partir deste retira-se o valor do raio (R) da curva circular e a extensão (L) da clotóide (secção 5.3.5). Depois de determinar os parâmetros de todas as curvas, procede-se ao cálculo do desenvolvimento do traçado em planta. Neste processo é gerada uma definição do traçado em planta.

Após se obter o traçado em planta, segue-se o traçado em perfil longitudinal com a introdução de concordâncias verticais.

6.3.4 Desenvolvimento do traçado em perfil longitudinal

O traçado em perfil longitudinal é definido através de alinhamentos retos designados em engenharia de vias por trainéis e curvas de concordâncias, como descrito na secção 5.3.6.

Os parâmetros de configuração por defeito para cada tipologia de estrada, como por exemplo, raio mínimo da concordância, inclinação mínima e máxima dos trainéis, entre outros, são carregado a partir de ficheiro.

Nesta implementação, por aproximação os vértices dos trainéis são escolhidos a partir dos vértices dos alinhamentos retos do traçado em planta. No cálculo do perfil longitudinal, optou-se por fixar o valor do raio (R_c) da concordância e a partir deste retirar o desenvolvimento (D) da concordância vertical (secção 5.3.6). Depois de determinados os parâmetros de todas as concordâncias, procede-se ao desenvolvimento do traçado em perfil longitudinal. Neste processo é gerada uma definição do traçado em perfil longitudinal.

Após o desenvolvimento do traçado do eixo da via, em planta e perfil longitudinal, são classificadas as extensões da via que são construídas em ponte e túnel. Este processo é realizado percorrendo o eixo da via e em função das condições referidas na secção 5.3.2, diferenças de cotas entre a estrada e o terreno, e extensão mínima em túnel, são identificadas as necessidades de pontes e túneis. Esta classificação é útil mais tarde na geração do modelo visual do ambiente rodoviário.

6.3.5 Perfil transversal

A definição do perfil transversal de uma estrada é a última tarefa a ser realizada, no que concerne ao traçado geométrico de uma estrada.

Dependendo do tipo de via, autoestrada, estrada secundária ou estrada nacional, é gerada procedimentalmente uma definição do perfil transversal. As características geométricas consideradas para o perfil transversal para cada tipo de via, apresentam-se na tabela 5.5 da secção 5.3.7.

Nesta implementação considera-se que um determinado perfil transversal pode ser definido para um troço específico de traçado, indexado em função da posição longitudinal da estrada (secção 6.5.1). Assim pode-se obter uma definição de perfil transversal para qualquer zona específica do traçado. Também é possível obter definições de zonas de transição, entre duas especificações de perfil transversal diferentes. Na definição do perfil transversal também é considerada a sobrelevação em curva. O ângulo de sobrelevação é especificado para cada vértice do eixo da via ao longo do traçado da estrada. Na geração do modelo visual do ambiente rodoviário é considerada a definição da sobrelevação.

A definição do perfil transversal gerada pode mais tarde ser consultada e editada pelo preparador do modelo de ambiente, permitindo cumprir a especificação de cada trabalho experimental.

6.4 Estrada e meio envolvente

O módulo *Road Enviro*, descrito na secção 5.4, trata da colocação da sinalização e da edição do modelo de terreno em função da rede de estradas criada.

6.4.1 Sinalização

A definição de um ambiente rodoviário deve incluir também a definição da sinalização rodoviária. A definição da sinalização horizontal é realizada em função do perfil transversal de cada estrada. Assim, as linhas de sinalização horizontal vão permitir definir as faixas de rodagem em cada estrada e as vias em cada faixa.

A especificação da marcação das linhas é realizada em função da distância longitudinal medida ao longo da estrada e da distância transversal relativamente ao eixo da via.

No caso da linha descontínua, foi definida uma relação espaço traço (10- espaço, 4- traço, para estradas projetadas para velocidades que variam entre os 60 km/h e os 120 km/h), em conformidade com as normas de marcas rodoviárias (InIR, 2015a).

Para a sinalização vertical, é gerada procedimentalmente uma definição em função do tipo de via em estudo, como por exemplo, sinalização de limite de velocidade. A sinalização de limite de velocidade está relacionada com a velocidade de base de cada estrada (InIR, 2010).

É também considerada, a definição de outros objetos típicos de um ambiente rodoviário, como por exemplo postes de iluminação, separadores de faixas de rodagem entre outros. Num ambiente típico de autoestrada, a separação entre faixas de rodagem pode ser realizada com a colocação de separadores metálicos, assim como as guardas de proteção lateral. Estes objetos típicos de um ambiente rodoviário são especificados de forma procedimental, ao longo do traçado.

6.4.2 Edição do modelo do terreno

A edição do terreno tem como finalidade adequar o modelo à rede de estradas gerada procedimentalmente. O módulo de edição do terreno, para além do modelo de terreno, necessita de conhecer as definições dos eixos das vias e dos respetivos perfis transversais.

O modelo de terreno editado é guardado num ficheiro independente, permitindo conservar o modelo original para utilizações futuras. É possível a especificação do mesmo nome provocando assim atualizações sucessivas do mesmo modelo de terreno de entrada.

Um método eficaz de efetuar a alteração do modelo do terreno em conformidade com o traçado de uma rede de estradas consistem em, para cada ponto do terreno, verificar se a sua cota é influenciada pela passagem das estradas. Para cada ponto do terreno, calcula-

se a distância mínima a cada estrada. Deste processo podem resultar taludes de escavação ou aterro, como ilustrado na figura 6.5.

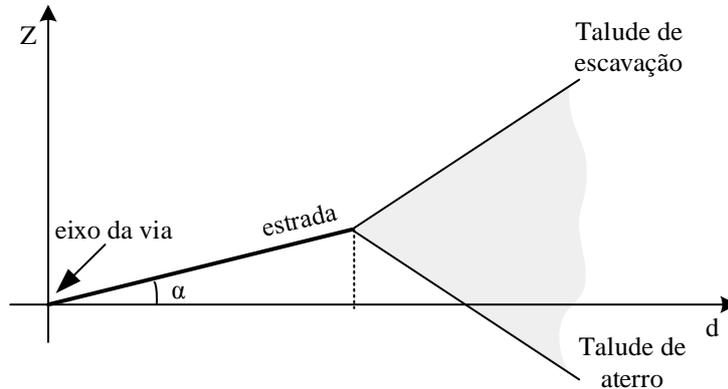


Figura 6.5 Taludes de escavação e aterro.

Na figura 6.6, apresentam-se duas imagens, onde se podem visualizar os taludes de escavação (esquerda) e aterro (direita).

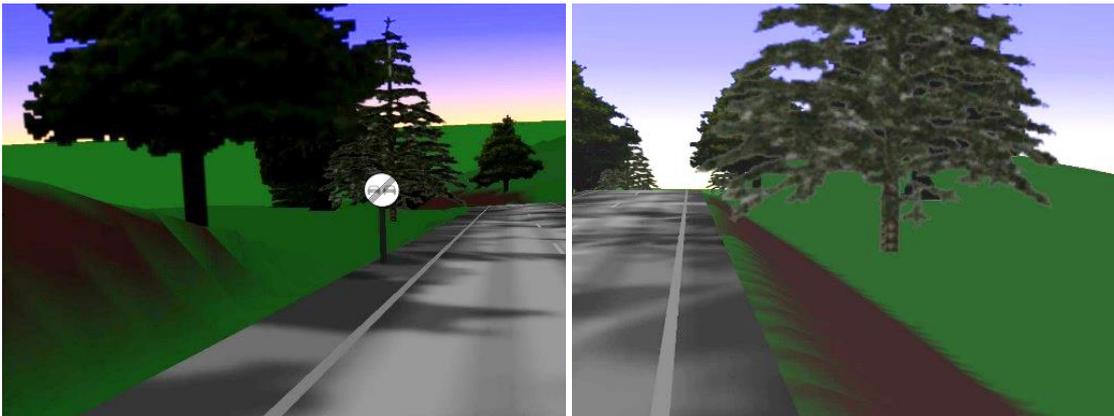


Figura 6.6 Talude de escavação (esq.) e aterro (dir.).

O processo implementado de edição do terreno garante que na análise de cada estrada, um ponto do terreno só é tratado uma única vez. Para otimizar este processo, os pontos do terreno que se encontrem relativamente longe das estradas não são tratados.

O módulo desenvolvido, para além de alterar a cota do modelo de terreno relativamente à passagem das estradas, guarda numa matriz a informação sobre a alteração de aspeto das zonas onde existiu movimentação de terras. As posições da matriz são indexadas pelos índices, linha e coluna. Assim à medida que os pontos do terreno vão sendo alterados devido à passagem das estradas, é associada uma etiqueta com o tipo de movimento de terras (aterro ou escavação), que mais tarde é consultada na geração do modelo visual. A estrutura de dados utilizada para guardar a informação sobre a alteração provocada no terreno integra a definição do terreno.

Na geração do modelo visual do terreno, estes atributos do terreno são consultados e os polígonos afetados são tratados em conformidade. Como se pode ver nas imagens da figura 6.6, as zonas mais acentuadas onde existiu alteração da cota do terreno devido à passagem da estrada, encontram-se com um aspeto diferente da restante paisagem.

6.5 Estrutura de dados

No método proposto, cada módulo do processo integrado de preparação de ambientes rodoviários produz uma definição do resultado gerado. Esta descrição é útil, não só como dados de entrada para os módulos seguintes, mas também para que o preparador do modelo possa interagir na definição gerada, editando o resultado obtido por cada módulo. Esta possibilidade de interação permite que se possam cumprir os requisitos específicos de cada ensaio experimental.

A definição de um modelo, obtida no final do processo integrado é composta pelas seguintes definições: rede (nós e ligações); corredores; eixos das vias; perfis transversais das estradas; sinalização e definição do modelo do terreno. A definição da rede é constituída pelas listas de nós e ligações entre pares de nós. A definição dos vértices do traçado em alinhamentos retos resulta do processo hierárquico de geração de corredores, em que em cada nível é gerada uma definição. Após obter o traçado da estrada em alinhamentos retos resultante do processo de geração de corredores, desenvolvem-se os traçados em planta e em perfil longitudinal, obtendo-se as definições dos eixos das vias, representados por uma lista ordenada de vértices. A partir da especificação de cada tipo de via é gerada a definição do perfil transversal. Esta organização do modelo da estrada permite posteriormente a geração automática da definição da sinalização e edição do modelo de terreno, pelo módulo *Road Enviro*. A partir da definição do eixo da via e do perfil transversal, o módulo *Models Generator* gera o modelo geométrico das estradas.

Na definição de um ambiente de simulação, referido na secção 2.1.3, também se pode encontrar a especificação do modelo dinâmico da simulação, como por exemplo: parametrização de outros veículos para além do veículo conduzido, colocação de peões, parametrização de eventos de tráfego, entre outros.

A vantagem desta organização é a facilidade com que o preparador do modelo, com um vulgar editor de texto, pode consultar e editar uma definição de um ambiente de simulação.

6.5.1 Definição da estrada

No processo integrado de geração de um modelo de ambiente rodoviário, o módulo *Centerline* de geração de traçado, produz uma definição da estrada composta pelos

corredores, eixos das vias e perfis transversais. Para cada nível na geração dos corredores é gerada uma definição, como referido na secção 5.5.

A definição final do eixo da via, resulta do desenvolvimento do traçado em planta e em perfil longitudinal, pelo módulo *Centerline*. Na definição de uma estrada, para além do eixo da via, é associada uma definição de sinalização e um perfil transversal. A seguir apresenta-se um exemplo da definição de uma estrada, que permite mais tarde gerar o modelo geométrico e iniciar a simulação de condução.

```
DEF_ROAD N3
    CENTERLINE estrada.pts
    ROADSINGS sinais.def
    PERFIL Nacional
    TYPE EN
END_ROAD
```

A etiqueta *DEF_ROAD* representa o início da secção de definição de uma estrada, seguindo-se o nome atribuído à estrada. Esta secção termina com a etiqueta *END_ROAD*. A seguir à etiqueta *CENTERLINE* define-se o nome do ficheiro correspondente ao eixo da via, que neste exemplo tem o nome *estrada.pts*. Na etiqueta *ROADSIGNS*, refere-se o nome do ficheiro de sinalização, onde se encontra definida a sinalização horizontal e vertical. O nome que se segue à etiqueta *PERFIL* refere-se ao tipo de perfil transversal. A especificação do perfil transversal gerada proceduralmente permite definir com pormenor o modelo geométrico da estrada. O perfil transversal refere-se às características geométricas da estrada em corte transversal, podendo obter-se diferentes definições de perfil transversal ao longo do traçado de uma estrada. Por último, a seguir à etiqueta *TYPE* é definido o tipo de via (AE, ES ou EN).

Uma estrada é normalmente composta pela faixa de rodagem, com uma ou mais vias, e bermas de ambos os lados. A definição do perfil transversal faz-se portanto pela indicação da largura total da plataforma da estrada e pela indicação do tipo de pavimento. O tipo de pavimento, para além de influenciar o aspeto visual, influencia o fator de aderência do carro à estrada e conseqüentemente o comportamento dinâmico. O tipo de pavimento também influencia a simulação do som, sendo produzido um som correspondente ao tipo de pavimento.

Em seguida apresenta-se uma definição típica do perfil transversal de uma estrada. Esta definição inicia-se com o separador *DEF_PERF*, seguindo-se o nome atribuído ao perfil, e termina com o separador *END_PERF*.

```
DEF_PERF Nacional
      OFFSET 0.0
      WIDTH 9.6
      PERFINIT 0.0
      PERFEND 12000.0
      SURFACE Betuminoso
      SPEED 50.0
END_PERF
```

O valor especificado na etiqueta *OFFSET* refere-se a um deslocamento transversal do modelo visual relativamente à definição do eixo da via. Esta parametrização permite que a partir da mesma definição do eixo da via, se possa obter mais do que uma representação visual. Como exemplo, pode ser utilizada na geração de modelos visuais de autoestrada, em que tipicamente se constroem duas faixas de rodagem paralelas, para a mesma definição do traçado. A segunda etiqueta *WIDTH*, refere-se à largura da plataforma da estrada. Os valores especificados nas etiquetas *PERFINIT* e *PERFEND* medidos ao longo do eixo da via, referem-se ao início e fim desta especificação do perfil transversal. Na etiqueta *SURFACE* é definido o tipo de pavimento, que mais tarde na geração do modelo visual é representado por uma textura. A seguir à etiqueta *SPEED* define-se o limite de velocidade legal permitido para esta estrada (em km/h).

A especificação do perfil transversal produzida é de fácil interpretação, permitindo que o preparador do ambiente rodoviário possa consultar e editar as definições geradas.

6.5.2 Definição da sinalização

A sinalização horizontal, caracterizada por marcações rodoviárias no pavimento, contínua ou descontínua, permite também definir com pormenor as vias de uma estrada, é indexada por distância transversal relativamente ao eixo da via e por posição longitudinal relativa ao início da estrada. Este formato de definição da sinalização horizontal permite obter troços de estrada com diferentes marcações rodoviárias. Em função do tipo de via, é gerada procedimentalmente uma definição da sinalização horizontal. Para a definição da sinalização horizontal, desenvolveu-se um formato próprio. A sinalização horizontal é especificada numa lista de separadores associados a cada estrada. Em seguida apresenta-se um exemplo da especificação de uma linha axial, eixo da via, utilizada na preparação de um ambiente rodoviário.

```
DEF_SEPARATOR
    LATDIST 0.0
    LINE ( D , 0.12 , 0.0 , 486.0 , 10.0 , 4.0 , BRANCO )
    LINE ( C , 0.12 , 486 , 4486.0 , BRANCO )
    LINE ( D , 0.12 , 4486.0 , 4991.0 , 10.0 , 4.0 , BRANCO )
    ...
END_SEPARATOR
```

No exemplo que se apresenta, *DEF_SEPARATOR* é a etiqueta de início da especificação de um separador horizontal, terminado com a etiqueta *END_SEPARATOR*. O valor numérico precedido da etiqueta *LATDIST* representa a distância transversal em metros do centro do separador ao eixo da via. Neste exemplo como se trata de uma linha axial, representada no centro da faixa de rodagem, o valor de *LATDIST* é zero.

A seguir à etiqueta *LATDIST* encontram-se a especificação das diferentes linhas associadas a este separador. Esta especificação pode ser constituída por uma sequência de linhas longitudinal de diferentes tipos, ou seja, podem ser encontradas várias etiquetas do tipo *LINE*. Associada à etiqueta *LINE* encontram-se definidos 7 campos, que correspondem à possibilidade de especificação de diferentes tipos de linha, contínua e descontínua. O primeiro campo após a etiqueta *LINE* corresponde ao tipo de linha a ser representada sobre o modelo da estrada (C - contínua, D - descontínua). O segundo campo após a etiqueta *LINE* corresponde à largura da linha. Neste exemplo corresponde a linhas com 0,12 metros de largura (12 cm). O terceiro e quarto campo correspondem, respetivamente, às posições longitudinais do início e do fim da representação da linha. Estes valores são especificados em metros e correspondentes à distância percorrida sobre o eixo da via desde o início da estrada. O quinto e sexto são necessários para a especificação de linhas descontínuas e representam a relação espaço-traço (10.0 - espaço / 4.0 - traço). Estes dois últimos campos, não são especificados no caso de se tratar de linhas contínuas, definidas com a letra C no primeiro campo. O último campo corresponde à cor da linha a ser representada na via. Neste exemplo, é especificada a cor branca através de uma etiqueta predefinida. É também possível definir qualquer cor através da especificação direta das suas componentes *RGB*. Normalmente são utilizadas apenas duas cores para marcações rodoviárias, branco para marcações definitivas e amarelo para marcações temporárias. No caso de sinalização horizontal com linha dupla, o modelo visual é obtido a partir da especificação de duas linhas simples, podendo cada uma delas ser de diferentes tipos (contínua ou descontínua).

A sinalização vertical, caracterizada por sinais verticais colocados nas laterais da faixa de rodagem, é indexada por distância transversal relativamente ao eixo da via e por posição longitudinal relativa ao início da estrada. Esta pode ser do tipo obrigatoriedade, proibição, informação de perigo ou simplesmente informativa. A sinalização vertical é especificada numa lista, associada à distância longitudinal da estrada. Desenvolveu-se

um formato próprio para a definição da sinalização vertical, de forma a tornar a tarefa de preparação de ambientes simples e amigável. A sintaxe de especificação desenvolvida para a definição procedimental da sinalização vertical, inicia-se com a etiqueta *DEF_SIGN* e termina com a etiqueta *END_SIGN*.

```
DEF_SIGN
    LATDIST 4.5
    LONGDIST 20.0
    ZROT 0.0
    MODEL limite_50kmEN
END_SIGN
```

Na etiqueta, *LATDIST*, está definida a posição transversal (4.5 m), relativamente ao eixo da via e medida sobre a sua perpendicular. A etiqueta *LONGDIST* permite definir a posição longitudinal (20.0 m), medida ao longo do eixo da via. Para além da especificação da posição longitudinal e da posição transversal, é possível efetuar uma rotação do modelo 3D em torno do eixo vertical z, definida na etiqueta *ZROT*. Esta vantagem permite orientar a superfície visual do sinal de forma a aumentar a sua visibilidade por parte do condutor. O último parâmetro, *MODEL*, permite indicar o tipo de sinal ao qual corresponde o modelo 3D do sinal vertical a colocar no ambiente. Desta forma, o preparador do modelo pode, de forma simples, consultar e editar a definição da sinalização gerada.

6.5.3 Definição de objetos

Um ambiente rodoviário é composto por inúmeros objetos envolventes, tais como, árvores, casas, arbustos, postes de iluminação, sinalização informativa, entre muitos outros. Foram desenvolvidas funcionalidades para a criação de ambientes rodoviários, considerando-se também a colocação de objetos envolventes. A tarefa de edição da definição de objetos pelo preparador do modelo é simples, pois pode ser realizada sobre um formato próprio, idêntico ao desenvolvido para a sinalização vertical. A sintaxe de especificação desenvolvida para a definição de um objeto no ambiente rodoviário apresenta-se a seguir.

```
DEF_OBJ
    LATDIST 5.0
    LONGDIST 4846.0
    ZROT 0.0
    MODEL posteA
END_OBJ
```

O valor 5.0 (m) definido na etiqueta *LATDIST* corresponde à posição transversal relativa ao eixo da via. O valor 4846.0 (m) definido na etiqueta *LONGDIST* corresponde à posição longitudinal medida ao longo da via. Na etiqueta *ZROT*, o valor 0.0° refere-se ao ângulo de rotação em torno do eixo vertical z. Na etiqueta *MODEL* é especificado o objeto a colocar no ambiente rodoviário.

Muitas vezes, a definição de objetos é referente a um modelo que se repete com intervalo constante ao longo do traçado da estrada, como por exemplo postes de iluminação e guardas de proteção. Para simplificar a definição de grupos de objetos deste tipo, que se repetem com um intervalo constante, desenvolveu-se uma sintaxe própria. A definição de um sinal repetitivo inicia-se com a etiqueta *DEF_OBJREP* e termina com a etiqueta *END_OBJ*, como se apresenta no exemplo a seguir.

```
DEF_OBJREP
    LATDIST 10.0
    INTERREP 100.0
    INITREP 0.0
    ENDREP 29160.0
    ZROT 0.0
    MODEL arvore5
END_OBJ
```

O valor 10.0 (m) definido na etiqueta *LATDIST* refere-se à posição transversal relativamente ao eixo da via. O valor 100.0 (m) especificado no parâmetro *INTERREP* corresponde ao intervalo de repetição das ocorrências do objeto. Em *INITREP* define-se qual a posição longitudinal (0.0 m), medida ao longo da via, a partir da qual se inicia a representação do modelo. Em *ENDREP* define-se à distância longitudinal (29160.0 m) ao longo da via em que termina a repetição do objeto. Na etiqueta *ZROT*, o valor 0.0°, corresponde ao ângulo de rotação do objeto em torno do eixo z. O nome *arvore5*, definido na etiqueta *MODEL*, identifica o modelo do objeto a colocar no ambiente rodoviário.

6.5.4 Definição do terreno

Para a definição de um terreno, relevo e condicionantes, desenvolveu-se um formato próprio. A definição de um terreno inicia-se com a etiqueta *DEF_TERRAIN* e termina com a etiqueta *END_TERRAIN*, como se exemplifica a seguir.

```
DEF_TERRAIN
    MODEL ASTGTM2_N41W009.bt
    MODELATTR ASTGTM2_N41W009.attr
END_TERRAIN
```

A seguir à etiqueta *MODEL* especifica-se o nome do ficheiro em mapa de elevação (*Digital Elevation Map, DEM*) do modelo do terreno, do qual se pretende gerar o respetivo modelo visual. Associado ao modelo de terreno pode existir uma especificação de atributos. Esta especificação encontra-se num ficheiro definido a seguir à etiqueta *MODELATTR*. No ficheiro de atributos pode-se encontrar, por exemplo, a definição do material da superfície do terreno a aplicar na criação do modelo visual.

As definições das condicionantes, como por exemplo, zonas florestais, cursos de água, edificações, entre outros, também se encontram especificadas no ficheiro de atributos, associado ao respetivo modelo de terreno.

6.6 Geração do modelo geométrico

A geração do modelo geométrico do ambiente rodoviário é realizada a partir das definições produzidas por cada um dos módulos do processo integrado de preparação de ambientes. A definição semântica gerada, contém toda a informação necessária para a criação automática dos modelos geométricos das estradas, da sinalização e do terreno (Campos, 2015a). Os modelos geométricos dos ambientes rodoviários, podem ser exportados para outros sistemas no formato nativo do *OpenSceneGraph*.

6.6.1 Modelo da estrada

Tipicamente, a representação de superfícies em sistemas gráficos é aproximada por uma malha poligonal, sendo as mais comuns as malhas triangulares. A superfície da estrada será representada graficamente por uma tira de triângulos (figura 5.23 da secção 5.6.1). A tira de triângulos formada ao longo da via é uma das primitivas gráficas disponíveis em *OpenSceneGraph*, designada por *TRIANGLE_STRIP*.

Sobre o modelo poligonal da via é mapeada uma textura de modo a criar um modelo de estrada mais realista, como se pode observar no exemplo da figura 6.7.



Figura 6.7 Modelo da estrada.

O processo de mapeamento da textura no modelo poligonal da estrada consiste na determinação das coordenadas 2D de textura para cada vértice. A partir das posições transversal e longitudinal dos vértices da estrada são determinadas as coordenadas (u, v) da textura. A coordenada u é determinada a partir da posição transversal dos vértices. As coordenadas v são obtidas a partir da posição longitudinal dos respetivos vértices da estrada. Como as estradas podem atingir várias dezenas de quilómetros, tipicamente é definida uma textura com uma dimensão longitudinal inferior, normalmente de 100 m de extensão. Na geração do modelo visual, no processo de mapeamento da textura, esta é repetida ao longo do trajeto.

Para acelerar o processo de geração de imagens em tempo real, o modelo é organizado numa estrutura hierárquica de acordo com a localização espacial. A hierarquização da estrada consiste em seccionar o modelo global em troços de menor extensão. Depois de obter todos os troços, estes são agrupados em conjuntos. Por sua vez agrupam-se os conjuntos de troços, e assim sucessivamente até se obter a árvore hierárquica do modelo da via, como se ilustra na figura 6.8.

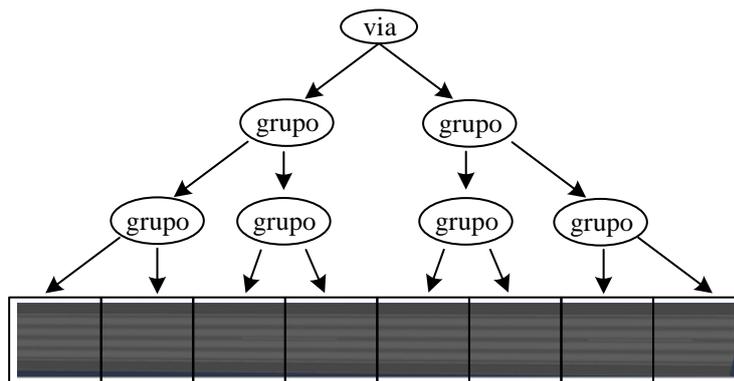


Figura 6.8 Estrutura hierárquica da estrada.

Nos níveis inferiores da árvore encontram-se os modelos de todos os troços da estrada. Os níveis superiores da estrutura hierárquica são obtidos por agrupamentos sucessivos destes modelos. A cada nó da árvore é adicionada informação sobre o volume envolvente de todos os segmentos individuais.

O modelo da via é também estruturado com diferentes níveis de detalhe (*LOD*), de forma a permitir aumentar as prestações do sistema de síntese de imagem. O primeiro nível de detalhe definido, correspondente a um modelo com pouco pormenor, consiste apenas pela visualização da plataforma da via. O nível de detalhe seguinte considera a visualização da via e a visualização da sinalização horizontal. O terceiro nível de detalhe corresponde a todo o modelo de ambiente rodoviário. A seleção do nível de detalhe adequado a visualizar é feita com base na distância ao observador.

6.6.2 Sinalização

No caso da sinalização horizontal, a definição de uma linha inclui a parametrização do tipo de linha, da espessura do traço, do início e do fim de representação, da cor e no caso de linhas descontínuas, a parametrização da relação espaço-traço, como referido na secção 6.5.2.

Tipicamente a sinalização horizontal tem uma coloração uniforme, branca ou amarela. Na sinalização horizontal apenas se utilizam polígonos com cor, não sendo realizada a tarefa de texturização. Desta forma, obtém-se um modelo igualmente realista com menos peso computacional na simulação em tempo real. Na imagem da figura 6.9, pode-se ver um ambiente rodoviário com sinalização horizontal, linha axial no centro da estrada e linhas guias de ambos os lados.

De forma a facilitar a deteção de visibilidade durante a visualização, na representação das linhas de sinalização horizontal juntamente com a hierarquização espacial da estrada é utilizada a técnica de representação hierárquica em camadas, designada por *layers*.

A sinalização vertical é colocada no ambiente rodoviário instanciando objetos 3D previamente modelados. Para a criação dos sinais verticais foram desenvolvidas ferramentas específicas, que a partir de um modelo geométrico 3D e de um material, produzem automaticamente um novo sinal. A base de dados de sinais criada, pode ser melhorada com a produção de novos sinais, bastando para isso utilizar às ferramentas desenvolvidas, escolher o tipo de sinal e o material a aplicar.

Um ambiente rodoviário com alguma complexidade pode facilmente atingir um elevado número de sinais verticais. O formato de especificação, apresentado na secção 6.5.2, permite que o preparador do modelo possa facilmente consultar e editar a definição de sinalização gerada procedimentalmente, impondo os requisitos específicos de cada ensaio experimental. Na figura 6.9, apresenta-se uma imagem de uma via rodoviária onde se pode ver a colocação de sinalização horizontal e vertical.

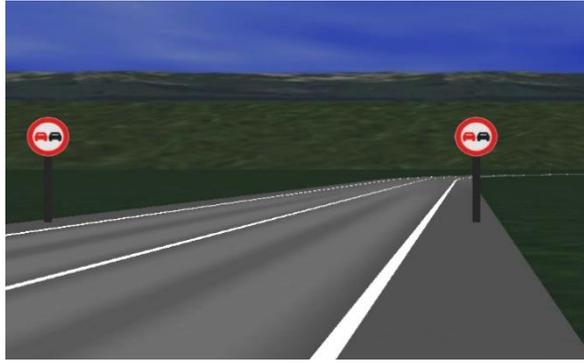


Figura 6.9 Sinalização horizontal e vertical.

Outros objetos podem fazer parte do ambiente rodoviário. A especificação de objetos é realizada num formato próprio descrito na secção 6.5.3. Tal como na sinalização vertical, os objetos são previamente modelados e posteriormente instanciados na criação do ambiente rodoviário. A colocação da sinalização vertical assim como a colocação dos objetos tem em consideração o modelo de terreno. Ao colocar a sinalização ou objetos no ambiente, estes são posicionados tendo em consideração a orientação do segmento da estrada e a cota do terreno. Na figura 6.10, apresenta-se uma imagem obtida do simulador de condução em funcionamento, onde se pode ver um ambiente rodoviário composto.



Figura 6.10 Ambiente rodoviário.

Na imagem da figura 6.10, para além do modelo da estrada, sinalização, terreno e árvores, também se pode ver um veículo a circular no mesmo sentido que o veículo conduzido. Na criação de um ambiente de simulação, também foi explorada a parametrização automática de veículos. Assim, podem facilmente ser colocados num ambiente de simulação veículos a circular no mesmo sentido e/ou em sentido contrário.

6.6.3 Modelo do terreno

A definição do modelo do ambiente rodoviário tem em consideração a especificação do modelo de terreno. O modelo do terreno deve ser adaptado à rede rodoviária construída.

Como referido na secção 6.4, a edição do modelo de terreno é realizada pelo módulo *Road Enviro*.

Na geração do modelo geométrico, o modelo de terreno deve ser organizado hierarquicamente, de forma semelhante ao que acontece com o modelo visual da estrada (Campos, 2007b). O processo de simplificação do modelo consiste em efetuar a divisão sucessiva do modelo de terreno em células, como se ilustra na figura 6.11.

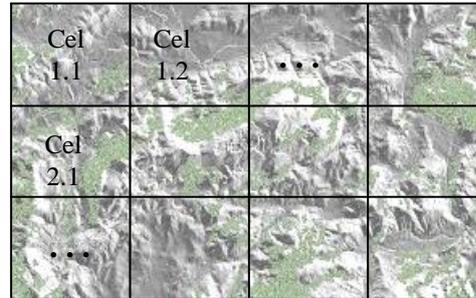


Figura 6.11 Divisão do terreno em células.

Para cada célula, são seleccionados os respetivos vértices. Após a seleção dos vértices para cada célula, procede-se a geração do modelo geométrico. A cada vértice do modelo poligonal do terreno é associado um material, de acordo com a classificação realizada na edição do modelo de terreno. Para se obter uma representação mais realista do modelo de terreno é mapeada uma textura.

Em cada nível da árvore hierárquica da figura 6.12, deve ser parametrizado um nó do tipo *LOD*, permitindo a eliminação de detalhe de áreas distantes durante processo de síntese de imagem.

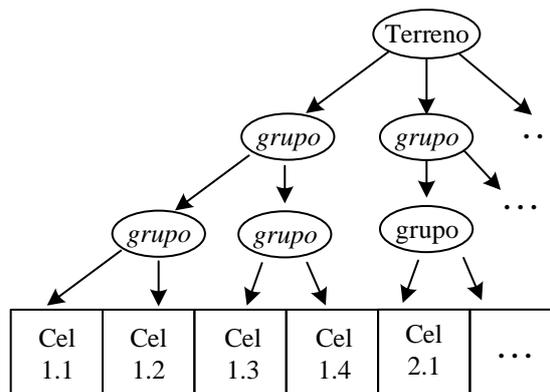


Figura 6.12 Árvore hierárquica do terreno.

Na implementação inicial do protótipo apresentado, apenas foram tratados os nós inferiores da árvore hierárquica. Com esta otimização no modelo de terreno, foi possível aumentar significativamente as prestações do sistema de síntese de imagem.

Sumário

Neste capítulo foram referidos os aspetos mais relevantes na implementação de um protótipo que aplica o método proposto no capítulo 5. O protótipo desenvolvido, permite a preparação integrada de qualquer tipo de ambiente rodoviário, adequado para simulação de condução, como se poderá concluir pelos resultados apresentados no capítulo 7. Foram adotados métodos de otimização, como a variação do nível de detalhe e a hierarquização espacial das estradas e do terreno, permitindo aumentar as prestações dos sistemas de síntese de imagem na visualização de ambientes de grandes dimensões. O protótipo descrito permite produzir modelos que cumprem as especificações detalhadas de cada trabalho experimental. A utilização do protótipo na preparação de ambientes para a realização de experiências atualmente a decorrer no simulador, contribuiu para o seu rápido amadurecimento.

No capítulo seguinte apresentam-se com mais detalhe os resultados obtidos, utilizando o protótipo desenvolvido, com base em estudo de casos.

Resultados

Neste capítulo são apresentados os modelos obtidos utilizando o protótipo funcional descrito no capítulo 6. Como referido na secção 1.3, um dos objetivos da realização deste trabalho reflete a necessidade de otimizar o tempo e o custo na preparação de ambientes rodoviários de grandes dimensões.

Uma das possíveis aplicações dos ambientes rodoviários produzidos é a sua utilização em simulação de condução. A qualidade e o realismo dos traçados rodoviários obtidos bem como dos modelos visuais são características importantes a ter em consideração na preparação modelos de ambientes para esta utilização.

Neste sentido, foi concebido e implementado um método que permite a preparação procedimental integrada de ambientes rodoviários, cujos resultados se apresentam neste capítulo.

7.1 Rede rodoviária

O método concebido para a criação automática redes, permite obter de forma simples e rápida uma grande diversidade de definições topológicas de redes de estradas. Este método, para a geração de uma definição topológica de uma rede permite que o utilizador possa especificar, como dados de entrada, um conjunto de nós de ligação. Os resultados que se apresentam nesta secção compreendeu a especificação de cidades, vilas e aldeias de Portugal continental, perfazendo um total de 33 nós. Os dados referentes à população de cada um dos nós foi retirada dos Censos 2011, disponibilizados pelo Instituto Nacional de Estatística (INE, 2011). As cidades, vilas e aldeias consideradas na geração da definição topológica da rede rodoviária, neste caso de estudo, assim como a respetiva população associada a cada nó, apresentam-se na tabela 7.1.

Tabela 7.1 Nós de ligação e respetiva população.

Cidade (18)	População	Vila (10)	População	Aldeia (5)	População
Aveiro	78450	Valença	14127	Barrancos	1834
Beja	35854	Freixo de Espada à cinta	3780	Bilhó	789
Braga	181494	Condeixa-a-Nova	17078	Escarigo	2532
Bragança	35341	Belmonte	6859	Albernoa	1532
Castelo Branco	56109	Aguiar da Beira	5473	Alcoutim	2917
Coimbra	143396	Grândola	14826	-	-
Évora	56596	Vidigueira	5932	-	-
Faro	64560	Arraiolos	7363	-	-
Guarda	42541	Vila Real de S. António	19156	-	-
Leiria	126897	Aljezur	5884	-	-
Lisboa	547733	-	-	-	-
Portalegre	24930	-	-	-	-
Porto	237591	-	-	-	-
Santarém	62200	-	-	-	-
Setúbal	121185	-	-	-	-
Viana do Castelo	88725	-	-	-	-
Vila Real	51850	-	-	-	-
Viseu	99274	-	-	-	-

Os valores dos parâmetros de configuração utilizados na geração topológica da rede rodoviária são:

- Custo de construção ($u.v/km$):
 - Autoestrada: 5 000 000
 - Estrada secundária: 2 500 000
 - Estrada nacional: 250 000
- Custo de operação ($u.v/km/veículo$): 0.2
- Índices de classificação de nós por tipologia (habitantes):
 - Cidade $\geq 20\ 000$
 - $3000 \geq$ Vila $< 20\ 000$
 - Aldeia < 3000
- Método de ordenação: Ordem decrescente de população

Os valores dos custos de construção foram determinados após consultar especialistas da área de projeto de vias. Os índices de classificação de nós, foram determinados analisando a classificação atual das cidades, vilas e aldeias em Portugal.

A partir da aplicação interativa de projeto topológico de redes rodoviárias descrita na secção 6.2, são lidas as definições dos nós de ligação de um ficheiro, apresentando-se a distribuição dos nós com diferentes cores em função da sua tipologia, como se ilustra na figura 7.1.

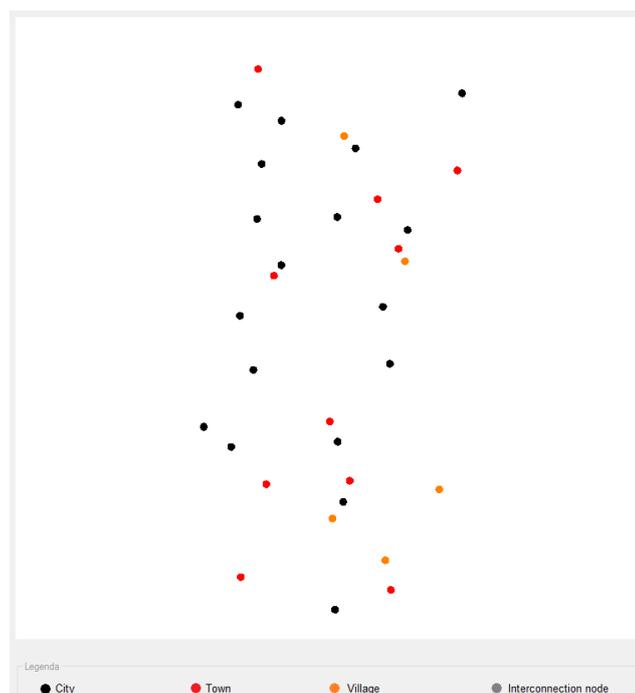


Figura 7.1 Nós de ligação organizados por tipologia.

Nesta figura, os nós do tipo cidade estão representados a cor preta, os nós do tipo vila estão representados a cor vermelha, e os nós do tipo aldeia estão representados a cor laranja.

Na primeira iteração é definida a rede de autoestradas, interligando nós do tipo cidade. A definição pretendida foi obtida utilizando os valores dos parâmetros de configuração a cima referidos, obtendo-se uma definição da rede de autoestradas, como se ilustra na figura 7.2.

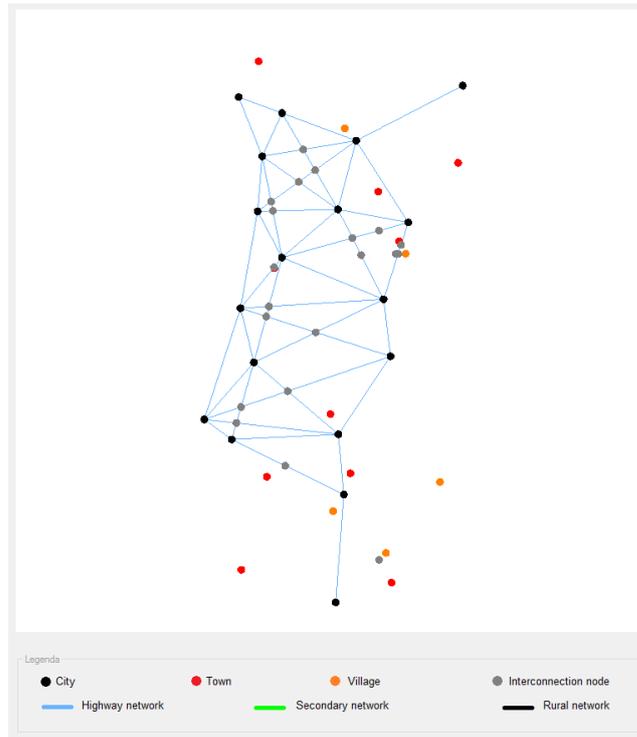


Figura 7.2 Rede topológica de autoestradas.

Após obter a definição da rede de autoestradas, representada a cor azul na figura 7.2, segue-se a geração da rede de estradas secundárias. Por último é gerada a rede de estradas nacionais. Na imagem da figura 7.3, pode-se ver toda a rede rodoviária gerada, rede de autoestradas, rede secundária e a rede nacional.

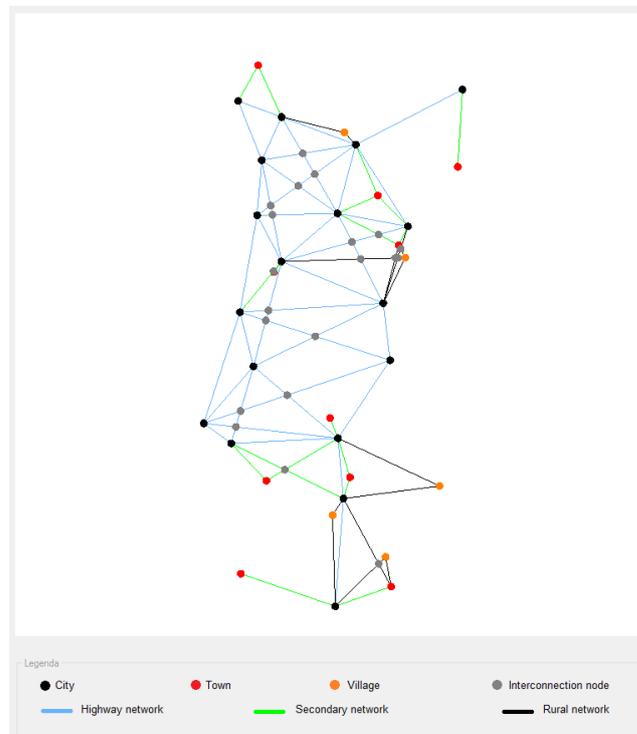


Figura 7.3 Rede topológica de estradas.

Nesta figura, a rede de autoestradas esta representada por ligações a azul, a rede de estradas secundárias por ligações a verde e a rede de estradas nacionais por ligações a preto. Como neste exemplo foram definidas apenas 5 aldeias, as ligações do tipo estrada nacional (preto) estão essencialmente concentradas junto aos nós do tipo aldeia (laranja). Neste exemplo foram analisados 33 nós correspondendo a 18 cidades, 10 vilas e 5 aldeias, resultando no final, uma rede rodoviária com 52 nós. Os nós representados a cinzento correspondem a nós de interligação resultantes da interseção de estradas das diferentes tipologias analisadas. Na figura 7.4, apresenta-se a rede de autoestradas gerada, mapeada sobre as 18 capitais de distrito de Portugal.

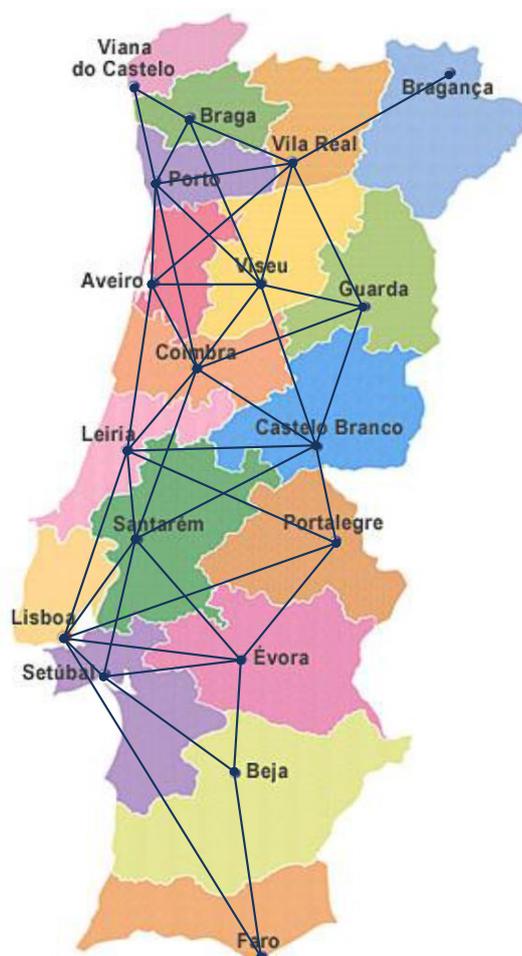


Figura 7.4 Capitais de distrito ligas por autoestrada.

Na tabela 7.2 apresenta-se a extensão total da rede de autoestradas gerada procedimentalmente e a extensão da rede real de autoestradas em Portugal, valor obtido em (IMT, 2011).

Tabela 7.2 Extensão da rede real e da rede gerada (km).

	Extensão da rede real	Extensão da rede gerada
Autoestrada	3770.0	3719.2

O valor apresentado para a extensão da rede de autoestradas, foi retirado do relatório de monitorização da rede rodoviária nacional com referência ao final de 2010, que pela classificação do PRN 2000, engloba a rede de IP's com cerca de 2217 km e a rede de IC's com cerca de 1553 km (IMT, 2011).

O valor obtido para a rede gerada proceduralmente apesar de considerar apenas as ligações entre capitais de distrito, mapeia ligações classificadas na rede real por IC's, as quais possuem características de autoestrada, como por exemplo, IC14 (Apúlia – Braga), IC23 (CRIP), IC25 (Alfena – Lousada), entre outras.

Analisado a rede de autoestradas gerada em termos da sua extensão, comparativamente com a rede de autoestradas real, considerando o conjunto das ligações IP e IC, pode-se concluir que esta tem aproximadamente a mesma extensão, como discutido anteriormente em (Campos, 2015c). No final do processo de geração de uma rede rodoviária é produzida a respetiva definição semântica. Na figura 7.3, apresenta-se um extrato da descrição semântica da rede.

Tabela 7.3 Definição topológica da rede de estradas.

<pre> <?xml version="1.0"?> <header> <Population_min> <City>20000</City> <Town>3000</Town> </Population_min> <BuildCost_km> <highway>50000</highway> ... </header> <network> <Nodes> <Node Id="0"> <long>-8.653683</long> <lat>40.640433</lat> <elev>0.0</elev> <pop>78450</pop> <type>city</type> </Node> <Node Id="1"> <long>-7.859988</long> ... </pre>	<pre> <highway> <Connection Id="0"> <Node>0</Node> <Node>5</Node> </ Connection > < Connection Id="1"> <Node>0</Node> <Node>9</Node> </ Connection > ... <nacional > < Connection Id="0"> <Node>1</No> <Node>28</No> </ Connection > < Connection Id="1"> <Node>1</Node> <Node>31</Node> </ Connection > ... </pre>
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Na tabela 7.4, apresentam-se as dimensões das redes topológicas geradas e os tempos necessários para a sua obtenção pelo método apresentado, com diferentes configurações de nós de entrada.

Tabela 7.4 Tempos de geração de redes rodoviárias.

Número total de nós	Cidades	Vilas	Aldeias	Rede autoestrada (km)	Rede secundária (km)	Rede nacional (km)	Tempo (s)
142	25	16	15	4303	1505	1812	11
52 ⁽¹⁾	18	10	5	3720	940	604	4
30	18	0	0	3720	-	-	2

(1) Dados correspondentes ao exemplo apresentado.

Os valores apresentados na tabela 7.4 foram medidos num computador, com processador Intel i7 a 2.4 GHz e 6 GB de memória RAM.

Sumário

Apesar do protótipo desenvolvido possuir a capacidade de propor autonomamente um conjunto inicial de nós de ligação, neste exemplo de estudo optou-se por utilizar um conjunto de nós previamente definidos. Esta opção tem, por um lado, a pequena desvantagem de não permitir demonstrar a distribuição automática de nós, mas por outro lado, ao introduzir como dados de entrada uma definição previamente conhecida, permite analisar comparativamente o resultado produzido. Assim, é também possível analisar mais facilmente a distribuição de nós por tipologia. Adicionalmente, em termos de ligações, consegue-se ter uma melhor avaliação do resultado gerado e efetuar uma análise qualitativa comparativamente com a rede rodoviária real, uma vez que são utilizados nós reais.

Analisando os resultados obtidos procedimentalmente, com a rede real de autoestradas em Portugal, pode-se concluir que o método concebido produz definições de redes similares às encontradas em rede reais (Campos, 2015). A rede secundária e a rede nacional produzida não podem ser comparadas com as redes reais, uma vez que o número de vilas e aldeias utilizadas neste exemplo não mapeia a realidade em Portugal. A aplicação interativa permite visualizar o resultado obtido para a definição global da rede topológica, assim como analisar cada uma das redes em particular, bastando para isso selecionar qual das tipologias se pretende visualizar, através da opção disponível no canto inferior direito do painel de controlo.

A definição semântica gerada permite uma análise textual do resultado obtido assim como a exportação para outros sistemas, em particular o simulador de condução, onde uma descrição deste nível é requerida para a organização hierárquica da rede rodoviária. Pelos resultados obtidos na geração da definição topológica de uma rede rodoviária, apresentados na 7.4, pode-se concluir que o processo implementado produz definições de forma rápida e eficiente com baixo custo em termos de tempo, servindo assim os propósitos pretendidos. Relativamente a outras abordagens, como abordado em

(Campos, 2015b), os ganhos em termos de tempo na obtenção de uma definição topológica de uma rede rodoviária, também se consideram positivos.

Para concluir, o método apresentado permite obter uma definição topológica de uma rede de estradas, sem recurso a especialistas de vias de comunicação, reduzindo assim os custos e o tempo de preparação de ambientes rodoviários.

7.2 Traçado rodoviário

Nesta secção apresentam-se os dados relativos a dois traçados rodoviários correspondentes a duas estradas, concebidas para velocidades de 60 km/h (nacional) e 120 km/h (autoestrada) respetivamente. As estradas geradas correspondem aos traçados utilizados na avaliação experimental por especialistas, apresentada na secção 8.2.1.

Na preparação dos modelos dos ambientes rodoviários, para a estrada nacional utilizou-se uma largura de referência da via de 12 m (faixa de rodagem, bermas e valetas), correspondendo a uma estrada com duas vias de circulação de 3.5 m cada (InIR, 2010), uma em cada sentido, como se ilustra na figura 7.5.

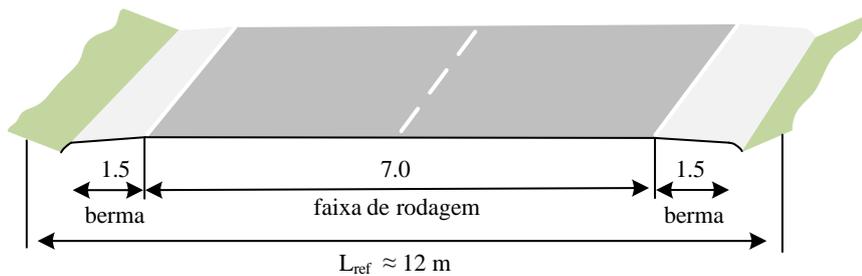


Figura 7.5 Largura de referência para a estrada nacional

Para a autoestrada, considerando um perfil transversal tipo, utilizou-se uma largura de referência de 40 m (plataforma da via, valetas, barreira de proteção para animais e taludes), com vias de rodagem de 3.75 m (InIR, 2010), como se ilustra na figura 7.6.

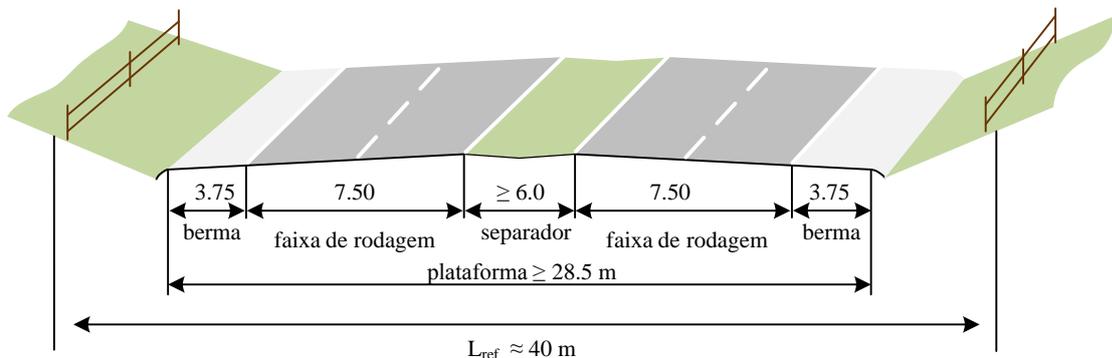


Figura 7.6 Largura de referência para a autoestrada.

Na avaliação de alternativas de traçado, considerou-se construção em ponte sempre que a altura (h) entre a cota da via e a cota do terreno tenha sido superior a 15 m ou em

atravessamentos de cursos de água. Considerou-se construção em túnel sempre que a altura (h) entre a cota da via e a cota do terreno tenha sido superior a 50 m e esta condição se tenha mantido numa extensão superior a 200 m. Estes valores de referência apresentados foram fixados após consultar especialistas em projeto de vias de comunicação.

7.2.1 Traçado dos corredores

O método concebido para a geração de corredores, produz várias definições de traçado, com um nível de detalhe crescente. Partindo da definição de uma ligação entre dois pontos, da definição das condicionantes e da definição do modelo de terreno, começa-se por gerar um conjunto de soluções de alto nível, com pouca pormenorização.

O modelo de terreno real definido em mapa de elevação correspondente à área geográfica dos nós de ligação em análise foi obtido do repositório *United States Geological Survey*⁶. As condicionantes foram definidas num ficheiro de imagem no formato *tiff*⁷.

Na imagem da figura 7.7, ilustra-se a representação dos nós de ligação e a representação das condicionantes num modelo de terreno.



Figura 7.7 Ligação inicial entre dois nós.

A partir da definição da ligação inicial entre dois nós, neste exemplo com cerca de 50km de extensão, geram-se um conjunto de hipótese de traçado.

Como se explica na secção 6.3.1, para o projeto de vias desta extensão é definido, num primeiro nível, um corredor com 5 km de largura, através de um traçado em

⁶ earthexplo-rer.usgs.gov

⁷ www.libtiff.org

alinhamentos retos. Aplicando o método descrito na secção 6.3.1, são propostas 5 hipóteses de traçado. Como exemplo, na imagem da figura 7.8 ilustram-se as 5 hipóteses geradas para a estrada nacional.



Figura 7.8 Hipóteses de traçado do corredor de 5 km de largura.

Cada uma destas hipóteses de traçado é em seguida analisada considerando o relevo do terreno e as respetivas condicionantes definidas, floresta e água. As condicionantes estão representadas na figura 7.8, pelas manchas a verde (floresta) e azul (água). Para cada uma das hipóteses, foram considerados os seguintes custos parciais:

- Construção da plataforma da via;
- Construção em ponte;
- Construção em túnel;
- Aterro;
- Escavação;
- Zona classificada (floresta, água);
- Custo de operação.

Na tabela 7.5 apresentam-se os valores em unidades de valor, parametrizados por defeito, para cada um dos indicadores considerados na avaliação de alternativas. Estes valores foram determinados após consultar especialistas na área de projeto de vias de comunicação.

Tabela 7.5 Valores de custo dos indicadores considerados.

Indicador	Via (u.v/m ²)	Ponte (u.v/m ²)	Túnel (u.v/m ²)	Aterro/ escavação (u.v/m ³)	Floresta (u.v/m ²)	Custo de operação	
						Tráfego (u.v/km/veículo)	Relevo (u.v de Δz /km/veículo)
Custo	65.0	700.0	2000.0	5.0	12.5	0.20	0.05

Na avaliação de cada uma das hipóteses obtém-se um valor de custo total, apresentado na tabela 7.6 para a estrada nacional e na tabela 7.7 para a autoestrada. Pelo método concebido é escolhida a hipótese de solução que apresente um menor valor de custo total.

Deste conjunto soluções, a hipótese 2 é aquela que apresenta um custo total menor, para os dois traçados. O facto da hipótese 2 apresentar um custo total menor deve-se essencialmente por ter uma menor extensão de construção em túnel, não acarretando assim um acréscimo de custos de construção. Outro aspeto é o facto de também não atravessar a condicionante água, refletindo-se numa menor extensão de construção em ponte.

O corredor selecionado com largura 5 km, para as duas estradas, é constituído por 7 segmentos retos (S_1, S_2, \dots, Z_7), sendo cada uma deles processado individualmente no nível seguinte. Na tabela 7.8/7.9 e 7.10/7.11, apresentam-se as hipóteses geradas para cada um dos 7 segmentos (S_i), para a estrada nacional e autoestrada respetivamente.

Após os vários níveis obtém-se o traçado final em alinhamentos retos. Como referido na secção 6.3.1, o número de iterações depende da extensão inicial da ligação entre dois nós. Neste exemplo a extensão inicial em linha reta é de cerca de 50 km, sendo efetuadas 3 níveis de iteração até se obter o traçado em alinhamentos retos.

Na tabela 7.12 e 7.13, é apresentada uma estimativa dos custos associados ao traçado final em alinhamentos retos (construção da via, construção em ponte e túnel, movimento de terras de escavação e aterro, as condicionantes consideradas: água e floresta, e custo de operação).

Após a execução do processo de geração de corredores, nesta fase de projeto, o traçado encontra-se definido em alinhamentos retos. O traçado em alinhamentos retos apresenta um nível pormenorização superior comparativamente com os resultados produzidos nas iterações anteriores (corredores), apresentando uma trajetória em altimetria mais próxima do terreno natural e considerando as condicionantes especificadas.

Nesta fase de projeto, como resultado de um maior detalhe na definição do traçado e uma maior aproximação ao terreno natural, o custo total de construção estimado é significativamente inferior aos calculados nas iterações anteriores.

Tabela 7.6 Hipóteses de corredores de 5km largura (nacional).

Hipótese	L via (m)	L ponte (m)	L túnel (m)	Floresta (m ²)	Água (m ²)	Aterro (m ³)	Escavação (m ³)	Max (aterro, escavação) (m ³)	Vol. Mov. T./m ² de estrada	Custo de operação	Custo total
1	47409.36	16570	1910	12592.9	7830.6	328274.7	3607861.5	3607861.5	6.9	4.04	262.9
2 ⁽¹⁾	47752.35	14800	1490	45040.0	0.0	361626.2	3864634.0	3864634.0	7.4	2.42	222.4
3	47515.69	7910	5280	0.0	9035.3	474619.1	5051929.5	5051929.5	9.7	2.96	269.1
4	47803.74	14530	3490	51110.6	9637.7	513284.4	4031198.0	4031198.0	7.9	3.25	259.1
5	48342.30	9360	6230	1769.4	7228.2	559478.3	3957819.8	3957819.8	7.8	2.76	292.1

(1) Dentro do conjunto de hipóteses analisadas, esta é a escolhida, avançando-se para a iteração seguinte.

Tabela 7.7 Hipóteses de corredores de 5km largura (autoestrada).

Hipótese	L via (m)	L ponte (m)	L túnel (m)	Floresta (m ²)	Água (m ²)	Aterro (m ³)	Escavação (m ³)	Max (aterro, escavação) (m ³)	Vol. Mov. T./m ² de estrada	Custo de operação	Custo total
1	47405.79	18090	2910	41960.78	26101.96	1057818.5	12939812.0	12939812.0	7.38	3.59	933.14
2 ⁽¹⁾	47752.35	15270	1720	150188.23	0.0	1432443.8	12722082.0	12722082.0	7.41	2.42	766.17
3	47515.69	7820	5290	0.0	29113.73	1808681.4	17333478.0	17333478.0	10.07	2.96	891.39
4	47803.74	14710	3280	171349.01	34133.34	1823676.5	13744061.0	13744061.0	8.14	3.25	879.06
5	48342.30	8910	6120	3968.63	24094.12	2084123.1	13359935.0	13359935.0	7.99	2.76	949.88

(1) Dentro do conjunto de hipóteses analisadas, esta é a escolhida, avançando-se para a iteração seguinte.

Tabela 7.8 Hipóteses de corredores de 1km de largura (nacional).

	Hipótese	L via (m)	L ponte (m)	L túnel (m)	Floresta (m ²)	Água (m ²)	Aterro (m ³)	Escavação (m ³)	Max (aterro, escavação) (m ³)	Vol. Mov. T./m ² de estrada	Custo de operação	Custo total
S ₁	1	6507.64	420	0	0.0	0.0	184031.3	73126.4	184031.3	3.3	0.39	10.0
	2	7113.04	110	0	0.0	0.0	93687.9	195702.9	195702.9	3.4	0.58	8.4
	3	7264.65	420	0	0.0	0.0	72625.1	140950.2	140950.2	2.4	0.58	10.3
	4 ⁽¹⁾	6279.25	180	0	0.0	0.0	124068.7	62311.9	124068.7	2.5	0.37	7.0
	5	6514.33	250	0	0.0	0.0	77224.5	186947.8	186947.8	3.4	0.35	8.4
S ₂	1 ⁽¹⁾	8712.15	120	0	0.0	0.0	212697.4	344562.5	344562.5	5.3	1.06	10.2
	2	9040.99	320	0	0.0	0.0	149865.3	483084.9	483084.9	5.8	0.92	14.3
	3	8484.82	470	0	0.0	0.0	111018.9	224441.4	224441.4	3.3	1.04	12.4
	4	9625.96	890	0	0.0	0.0	121268.3	526826.6	526826.6	5.6	1.05	19.3
	5	8526.54	870	0	0.0	0.0	205183.1	129507.1	205183.1	3.3	0.85	15.0
S ₃	1	11014.38	460	0	22856.5	0.0	237767.2	711497.5	711497.5	7.2	1.22	19.1
	2	10267.00	1150	0	0.0	0.0	127520.7	547123.7	547123.7	5.5	1.20	22.4
	3	11101.15	120	0	22164.7	0.0	80157.9	916500.4	916500.4	7.5	1.04	18.8
	4 ⁽¹⁾	10038.00	760	0	26456.5	0.0	328130.2	485546.3	485546.3	6.8	0.92	17.6
	5	11287.54	470	510	24042.4	0.0	141950.2	407669.7	407669.7	4.1	0.96	28.1
S ₄	1	6925.47	1190	0	0.0	0.0	151557.5	64755.5	151557.5	2.6	0.62	15.6
	2	6260.52	320	0	0.0	0.0	99728.3	287657.0	287657.0	5.2	0.68	10.2
	3	6777.33	120	0	0.0	0.0	185148.6	255497.6	255497.6	5.4	1.03	8.7
	4 ⁽¹⁾	5932.88	170	0	0.0	0.0	183109.5	138364.0	183109.5	4.5	0.93	7.5
	5	6471.85	720	0	0.0	0.0	183608.5	262958.7	262958.7	5.8	0.84	12.9

(1) Dentro do conjunto de hipóteses analisadas, esta é a escolhida.

Tabela 7.9 Hipóteses de corredores de 1km de largura (nacional, cont.).

	Hipótese	L via (m)	L ponte (m)	L túnel (m)	Floresta (m ²)	Água (m ²)	Aterro (m ³)	Escavação (m ³)	Max (aterro, escavação) (m ³)	Vol. Mov. T./m ² de estrada	Custo de operação	Custo total
S ₂	1	8834.30	1300	0	20461.2	0.0	132008.5	533956.1	533956.1	6.3	1.04	22.8
	2	8730.10	1010	0	23472.9	0.0	114732.8	735180.9	735180.9	8.1	1.31	16.0
	3	8765.08	820	0	24084.7	0.0	116515.2	513511.8	513511.8	6.0	1.09	18.9
	4 ⁽¹⁾	9551.54	210	0	22880.0	0.0	306841.6	232313.3	306841.6	4.7	1.21	12.4
	5	8846.32	550	0	23477.6	0.0	92451.2	523719.1	523719.1	5.8	1.05	16.8
S ₃	1	5694.06	300	0	15058.8	0.0	33857.2	222606.8	222606.8	3.8	0.97	9.9
	2	6419.41	1050	0	16856.5	0.0	88852.0	467715.1	467715.1	7.2	0.78	17.9
	3 ⁽¹⁾	5881.34	160	0	16254.1	0.0	117147.7	443335.9	443335.9	7.9	0.83	9.5
	4	5951.38	580	0	14447.1	0.0	101785.3	464500.1	464500.1	7.9	1.10	13.9
	5	5983.52	770	0	15656.5	0.0	109181.0	305817.1	305817.1	5.8	0.89	13.6
S ₄	1	7403.37	1950	0	0.0	7228.2	104016.7	466391.6	466391.6	6.4	1.12	25.5
	2	7858.71	2160	0	0.0	5421.2	176910.1	261555.7	261555.7	4.6	1.29	25.2
	3 ⁽¹⁾	7637.10	940	0	0.0	0.0	111594.3	279934.2	279934.2	4.3	1.04	16.1
	4	7876.17	1020	0	0.0	602.4	79251.4	740186.3	740186.3	8.7	1.10	21.9
	5	7375.68	1270	0	0.0	2409.4	124499.7	277259.0	277259.0	4.5	0.95	18.0

(1) Dentro do conjunto de hipóteses analisadas, esta é a escolhida.

Tabela 7.10 Hipóteses de corredores de 1km de largura (autoestrada).

	Hipótese	L via (m)	L ponte (m)	L túnel (m)	Floresta (m ²)	Água (m ²)	Aterro (m ³)	Escavação (m ³)	Max (aterro, escavação) (m ³)	Vol. Mov. T./m ² de estrada	Custo de operação	Custo total
S ₁	1	5925.66	320	0	0.0	0.0	307153.4	310812.9	310812.9	2.61	0.34	24.9
	2	6430.84	60	0	0.0	0.0	401416.7	1419170.1	1419170.1	7.0	0.26	29.1
	3	5829.84	150	0	0.0	0.0	285083.6	708942.4	708942.4	4.2	0.33	21.1
	4 ⁽¹⁾	6197.92	20	0	0.0	0.0	496427.1	422281.9	496427.1	3.7	0.25	19.2
	5	6024.87	90	0	0.0	0.0	158423.6	1294801.0	1294801.0	6.0	0.42	28.2
S ₂	1	8231.12	1100	0	0.0	0.0	616582.0	1243203.6	1243203.6	5.6	0.80	59.4
	2	7968.55	2750	0	0.0	0.0	102121.6	1004342.9	1004342.9	3.4	0.52	99.3
	3	7751.58	910	0	0.0	0.0	134312.9	803715.9	803715.9	3.0	0.62	51.0
	4 ⁽¹⁾	7776.58	610	0	0.0	0.0	440141.0	721984.5	721984.5	3.7	0.37	40.8
	5	8080.96	1460	0	0.0	0.0	344111.7	1204911.5	1204911.5	4.7	0.55	67.4
S ₃	1	9650.73	1690	0	74196.0	0.0	636397.9	1927444.4	1927444.4	6.6	0.68	83.4
	2 ⁽¹⁾	10077.77	480	0	56980.3	0.0	703273.8	1994945.1	1994945.1	6.6	0.74	54.2
	3	9908.47	1120	0	63615.6	0.0	742295.4	2591585.0	2591585.0	8.4	0.70	77.4
	4	9692.82	1580	0	0.0	0.0	477445.0	3028827.8	3028827.8	9.0	0.93	92.1
	5	9930.18	2410	0	0.0	0.0	586009.9	1802202.3	1802202.3	6.0	0.92	102.9
S ₄	1 ⁽¹⁾	5937.32	160	0	0.0	0.0	414002.7	1115767.1	1115767.1	6.4	0.41	27.8
	2	5598.57	930	0	0.0	0.0	313619.3	1507454.9	1507454.9	8.1	0.50	51.4
	3	5743.05	160	0	0.0	0.0	162291.8	2310594.8	2310594.8	10.6	0.44	40.2
	4	6081.57	1230	330	0.0	0.0	372508.0	909759.8	909759.8	5.7	0.52	77.2
	5	5951.50	430	0	0.0	0.0	362371.1	1997809.4	1997809.4	9.9	0.62	44.4

(1) Dentro do conjunto de hipóteses analisadas, esta é a escolhida.

Tabela 7.11 Hipóteses de corredores de 1km de largura (autoestrada, cont.).

	Hipótese	L via (m)	L ponte (m)	L túnel (m)	Floresta (m ²)	Água (m ²)	Aterro (m ³)	Escavação (m ³)	Max (aterro, escavação) (m ³)	Vol. Mov. T./m ² de estrada	Custo de operação	Custo total
S ₅	1	8249.84	190	860	64156.8	0.0	343649.3	1807710.1	1807710.1	6.5	0.80	103.7
	2	8240.99	1060	490	62211.7	0.0	301904.6	1345084.8	1345084.8	5.0	0.96	99.0
	3	8005.46	460	500	64219.6	0.0	267554.6	2310699.3	2310699.3	8.0	0.85	93.1
	4 ⁽¹⁾	8223.66	720	450	60235.2	0.0	402846.1	1098405.3	1098405.3	4.5	0.78	80.6
	5	7985.92	1200	540	62211.7	0.0	398384.7	1399687.5	1399687.5	5.6	0.80	103.5
S ₆	1	5589.81	2430	0	48156.8	0.0	91668.0	631670.1	631670.1	3.2	0.46	82.4
	2	5210.70	2000	0	41819.6	0.0	156604.9	924702.4	924702.4	5.1	0.37	73.7
	3	5666.26	2650	0	42078.4	0.0	178052.4	557395.5	557395.5	3.2	0.66	86.6
	4 ⁽¹⁾	5363.47	1380	0	44141.1	0.0	164780.3	1177491.4	1177491.4	6.2	0.59	59.0
	5	5368.53	2180	0	42141.1	0.0	112049.5	1800635.8	1800635.8	8.9	0.54	85.8
S ₇	1	7178.14	2590	0	0.0	1003.9	246051.3	1451882.5	1451882.5	5.9	0.67	96.1
	2	7096.21	2230	0	0.0	1003.9	523640.8	1591428.1	1591428.1	7.4	0.72	88.3
	3	6954.59	2210	0	0.0	3011.7	176041.7	1928352.4	1928352.4	7.5	0.46	92.8
	4	7171.05	2870	0	0.0	30117.6	615306.0	296788.6	615306.0	3.1	0.50	94.9
	5 ⁽¹⁾	7164.28	1590	0	0.0	0.0	607402.8	3017693.0	3017693.0	12.5	0.57	84.4

(1) Dentro do conjunto de hipóteses analisadas, esta é a escolhida.

Tabela 7.12 Traçado final em alinhamentos retos (nacional).

L via (m)	L ponte (m)	L túnel (m)	Floresta (m ²)	Água (m ²)	Aterro (m ³)	Escavação (m ³)	Max (aterro, escavação) (m ³)	Vol. Mov. T./m ² de estrada	Custo de operação	Custo total
54032.27	2150	0	65590.6	0.0	1398557.0	2146621.0	2146621.0	5.5	6.37	79.8

Tabela 7.13 Traçado final em alinhamentos retos (autoestrada).

L via (m)	L ponte (m)	L túnel (m)	Floresta (m ²)	Água (m ²)	Aterro (m ³)	Escavação (m ³)	Max (aterro, escavação) (m ³)	Vol. Mov. T./m ² de estrada	Custo de operação	Custo total
50741.00	4640	0	161356.86	0.0	3322381.3	11697452.0	11697452.0	7.40	3.71	385.81

Nas imagens da figura 7.9, apresentam-se os traçados em alinhamentos retos para a estrada nacional e para a autoestrada.



Figura 7.9 Traçados em alinhamentos retos da nacional (esq.) e autoestrada (dir.).

Após obter a definição do traçado final em alinhamentos retos é realizada uma avaliação entre a cota da estrada e a cota do terreno, identificando os troços onde existe movimentação de terras, aterro e escavação. Também são identificados os troços construídos em ponte, em túnel. Na tabela 7.14, apresenta-se um extrato da caracterização dos troços da estrada nacional.

Tabela 7.14 Caracterização da estrada nacional.

Escavação		Aterro		Ponte	
Início (m)	Extensão (m)	Início (m)	Extensão (m)	Início (m)	Extensão (m)
...
930	250	1190	10	6310	10
1220	510	1740	20	6980	20
1770	10	1820	20	9260	10
1800	10	1870	120	11030	60
1850	10	2260	30	14290	30
...

A avaliação do traçado final em alinhamentos retos com o terreno não identifica a construção em túnel, não sendo apresentada a coluna correspondente. Nesta fase de projeto, o traçado em alinhamentos retos encontra-se com a definição adequada ao desenvolvimento do traçado final em planta, com a introdução de curvas compostas (secção 6.3.3), e em perfil longitudinal com a introdução de concordâncias verticais (secção 6.3.4).

Sumário

O método concebido para a geração do traçado em alinhamentos retos, produz várias definições de corredores com um nível de detalhe crescente.

A escolha da solução em cada nível de detalhe, reflete o relevo do terreno e as respectivas condicionantes, como se pode analisar pelos dados apresentados. A escolha de cada definição do traçado pondera a movimentação de terras, a construção em ponte, a construção em túnel e o impacto com as condicionantes, refletindo-se num menor custo total.

A definição do traçado em alinhamentos retos possui o detalhe adequado ao desenvolvimento do traçado em planta.

7.2.2 Traçado em planta

O traçado em planta resulta da introdução de curvas compostas, descritas na secção 6.3.3, sobre o traçado definido em alinhamentos retos.

Na imagem da figura 7.10 apresenta-se um excerto da definição do traçado em alinhamentos retos (preto) e do traçado em planta com a introdução de curvas compostas (azul).

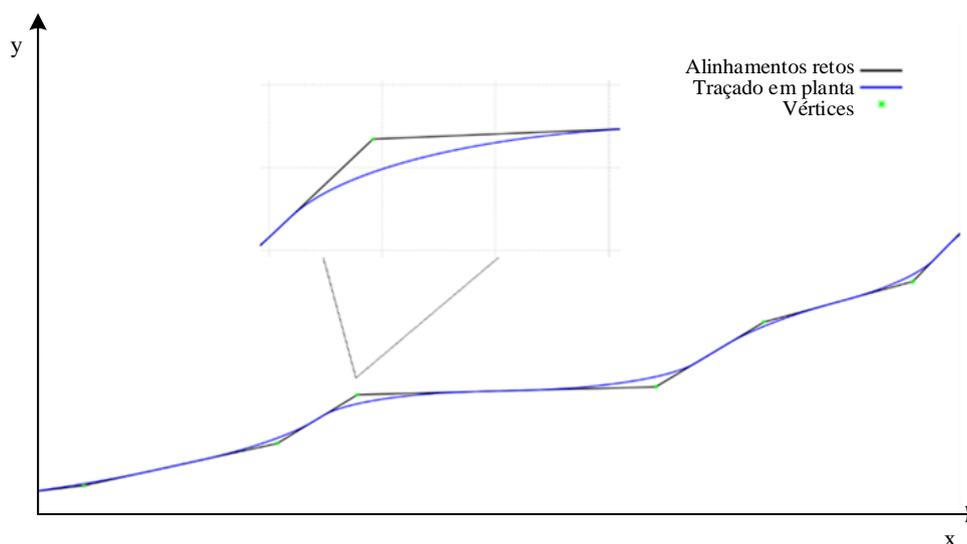


Figura 7.10 Traçado em alinhamentos retos e em planta.

Como se pode ver pela figura 7.10, o traçado em planta é obtido com a introdução de curvas compostas nos vértices do traçado em alinhamentos retos.

Na figura 7.11, apresenta-se o traçado em planta produzido após a introdução de curvas compostas para a estrada nacional.

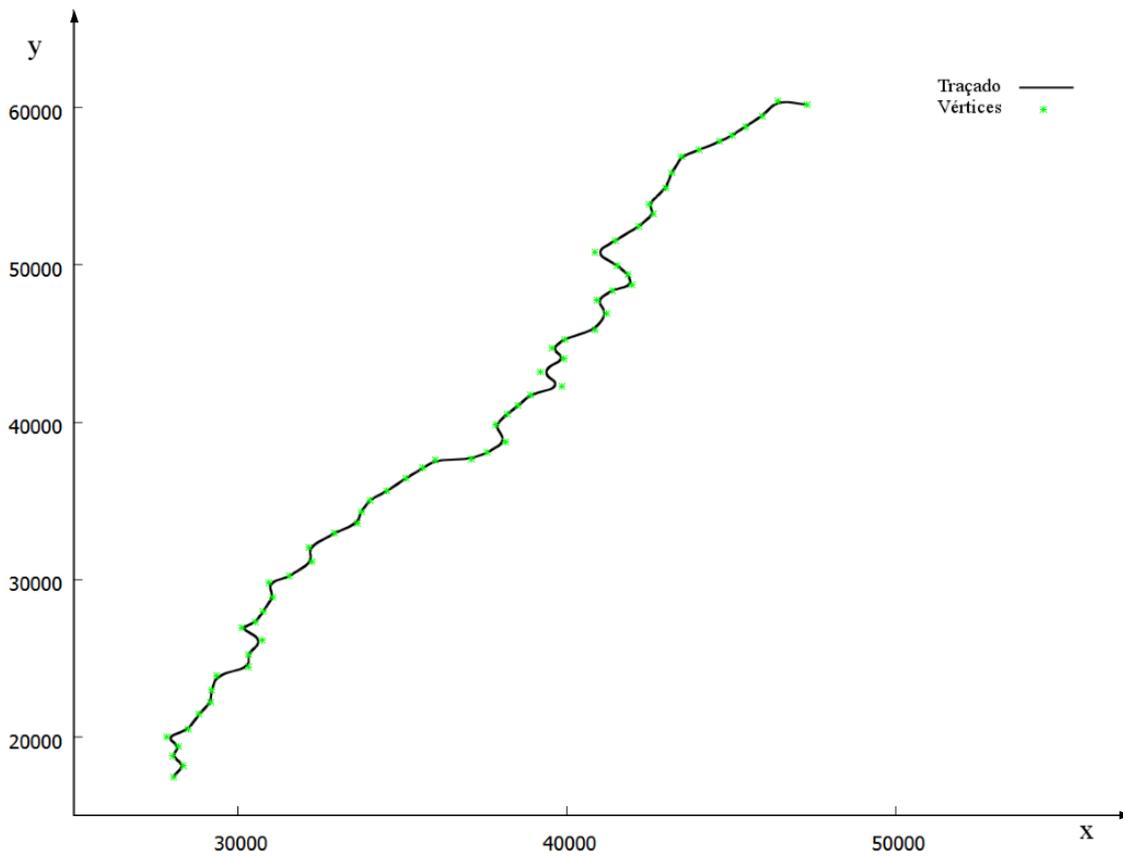


Figura 7.11 Traçado em planta da estrada nacional.

O traçado da estrada nacional apresentado possui cerca de 50 km de extensão, o que torna difícil a sua análise de forma rigorosa apenas pela visualização de imagens. Na tabela 7.15, apresenta-se um excerto dos dados de projeto relativos ao traçado da estrada nacional, e correspondentes aos dados analisados pelos especialistas em projeto de vias na avaliação experimental, apresentada na secção 8.2.1.

Pelos dados de projeto torna-se mais fácil realizar uma análise rigorosa das características geométricas do traçado da estrada. A análise aos dados apresentados permite avaliar se estes cumprem os objetivos pretendidos, como as normas de traçado e as boas práticas de projeto de vias de comunicação.

Tabela 7.15 Dados do traçado em planta (nacional).

id	Retas		Curvas compostas												
	Início (m)	L reta (m)	Início (m)	A clotóide (m)	Raio (m)	L clotóide (m)	τ (rad)	Xm (m)	Tcci (m)	α desvio (rad)	α desvio (grados)	Sentido curva	d arco (m)	D total (d + 2L)	Tempo curva composta (seg)
...
7	3771.23	576.34	4347.57	160	1250	20.48	0.01	10.24	58.13	0.0929	5.91	R	95.70	136.66	8.2
8	4484.23	519.65	5003.88	160	1250	20.48	0.01	10.24	236.44	0.3739	23.80	L	446.88	487.84	29.3
9	5491.72	471.33	5963.05	160	1250	20.48	0.01	10.24	70.84	0.1132	7.20	R	121.04	162.00	9.7
10	6125.05	378.66	6503.71	160	903	28.34	0.02	14.17	420.64	0.8716	55.48	R	758.95	815.63	48.9
11	7319.34	338.73	7658.07	160	592	43.25	0.04	21.63	351.51	1.0717	68.22	L	591.01	677.52	40.7
12	8335.60	90.08	8425.67	160	1250	20.48	0.01	10.24	307.29	0.4821	30.69	R	582.14	623.10	37.4
13	9048.77	209.76	9258.53	160	717	35.70	0.02	17.85	462.40	1.1455	72.92	L	785.61	857.01	51.4
14	10115.54	250.79	10366.33	160	298	89.35	0.33	64.45	195.83	1.5426	98.20	R	175.94	354.64	21.3
15	10800.98	31.28	10832.25	160	911	28.32	0.01	12.66	257.76	0.4992	31.78	L	479.43	536.07	32.2
16	11362.32	406.08	11768.40	160	1250	20.48	0.01	10.24	30.99	0.0496	3.15	L	41.49	82.45	4.9
17	11850.85	657.78	12508.63	160	1250	20.48	0.01	10.24	266.58	0.4202	26.75	L	504.81	545.77	32.7
18	13054.40	256.46	13310.86	160	551	46.46	0.04	23.23	330.85	1.0813	68.83	R	549.30	642.22	38.5
19	13953.08	184.59	14137.67	160	1250	20.48	0.01	10.24	195.20	0.3098	19.72	L	366.79	407.75	24.5
...

Como referido anteriormente nesta secção, foram gerados dois traçados rodoviários, autoestrada e estrada nacional. Na figura 7.12, apresenta-se o traçado em planta para a autoestrada.

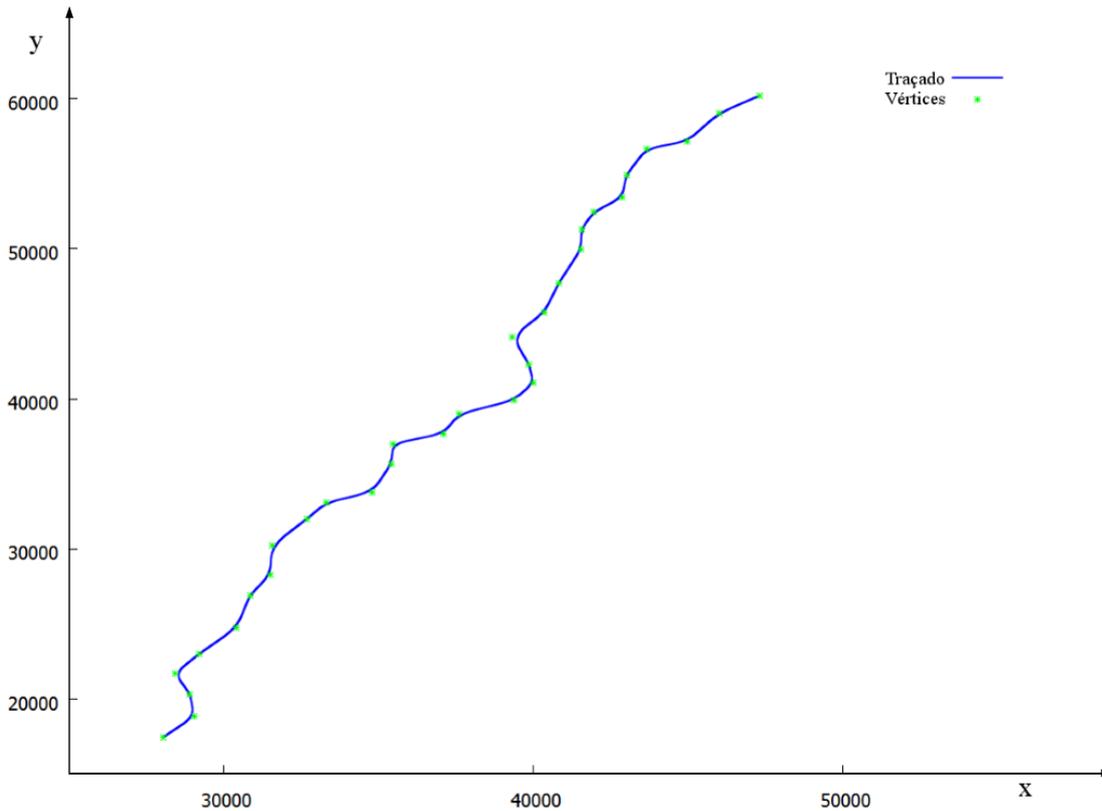


Figura 7.12 Traçado em planta da autoestrada.

Pela imagem da figura 7.12 e comparativamente com a imagem da figura 7.11 correspondente à estrada nacional, verifica-se que a autoestrada apresenta uma sinuosidade menor, tal como seria de esperar para uma via desta tipologia. Na tabela 7.16, apresenta-se um excerto dos dados de projeto relativos ao traçado da autoestrada, e correspondentes aos dados analisados pelos especialistas em projeto de vias na avaliação experimental, apresentada na secção 8.2.1.

Tabela 7.16 Dados do traçado em planta (autoestrada).

id	Retas		Curvas compostas												
	Início (m)	L reta (m)	Início (m)	A clotóide (m)	Raio (m)	L clotóide (m)	τ (rad)	Xm (m)	Tcci (m)	α desvio (rad)	α desvio (grados)	Sentido curva	d arco (m)	D total (d + 2L)	Tempo curva composta (seg)
1	0.00	1012.55	1012.55	500	1677	149.12	0.0445	74.55	626.56	0.7151	45.52	L	1049.76	1347.99	40.4
2	2360.54	248.39	2608.93	500	4000	62.50	0.0078	31.25	520.77	0.2589	16.48	L	973.21	1098.21	32.9
3	3707.14	236.27	3943.41	500	1203	207.89	0.0864	103.92	569.91	0.8842	56.28	R	855.36	1271.14	38.1
4	5214.55	680.31	5894.86	500	4000	62.50	0.0078	31.25	135.12	0.0675	4.29	R	207.63	332.63	10.0
5	6227.50	1087.20	7314.69	500	4000	62.50	0.0078	31.25	835.80	0.4120	26.22	L	1585.38	1710.38	51.3
6	9025.07	812.70	9837.77	500	4000	62.50	0.0078	31.25	497.50	0.2475	15.75	R	927.41	1052.41	31.6
7	10890.18	261.05	11151.23	500	3272	76.40	0.0117	38.20	689.22	0.4152	26.43	L	1282.14	1434.94	43.0
8	12586.18	270.28	12856.46	500	3260	76.68	0.0118	38.34	894.00	0.5353	34.07	R	1668.38	1821.75	54.7
9	14678.21	1078.04	15756.26	500	4000	62.50	0.0078	31.25	68.76	0.0344	2.18	L	75.01	200.01	6.0
10	15956.27	582.49	16538.76	500	1668	149.92	0.0450	74.96	515.13	0.5991	38.13	R	849.01	1148.86	34.5
11	17687.61	277.44	17965.05	500	1584	157.83	0.0498	78.91	682.58	0.8135	51.78	L	1130.66	1446.33	43.4
12	19411.39	650.23	20061.61	500	4000	62.50	0.0078	31.25	523.24	0.2601	16.56	L	978.05	1103.05	33.1
...

Sumário

O método concebido para a geração do traçado rodoviário, produz uma definição em alinhamentos retos, em que logo à partida as retas apresentam extensões diferentes (tabela 6.2 da secção 6.3.1).

Para a estrada nacional o valor médio da extensão dos alinhamentos retos gerados é de 871.49 m, com um desvio padrão de $\sigma=336.71$. Para a autoestrada o valor médio da extensão dos alinhamentos retos gerados é de 1691.37 m, com um desvio padrão de $\sigma=179.01$.

No desenvolvimento do traçado em planta, com a introdução de curvas compostas, os alinhamentos retos adjacentes são encurtados em função das definições das curvas. No final é produzido um traçado rodoviário em que tanto a extensão das retas, como a extensão e nível de curvatura são dependentes do tipo de via previamente definido, como se pode constatar pelos dados apresentados nas tabelas 7.15 (nacional) e 7.16 (autoestrada).

Como referido na secção 6.3.3, uma curva composta é definida por uma clotóide de entrada, arco de curvatura e clotóide de saída. O desenvolvimento (L) da clotóide depende do parâmetro A e do raio (R) da curva. O desenvolvimento do arco depende do raio (R) da curva e do ângulo dos alinhamentos. Para ambos os traçados, estrada nacional e autoestrada, a escolha do parâmetro (A) da clotóide verifica a condição de implantação (secção 3.5.1).

A variação do ângulo de desvio dos alinhamentos retos e a variação do raio (R) da curva circular, contribuem para que os desenvolvimentos das curvas compostas apresentem também desenvolvimentos diferentes ao longo do traçado. Para a estrada nacional, as curvas apresentam um valor médio desenvolvimento de 486.82 m ($\sigma=249.25$) e para a autoestrada as curvas apresentam um valor de médio de desenvolvimento de 1163.98 m ($\sigma=483.43$).

A diversidade das extensões das reta e a disparidade do desenvolvimento das curvas ao longo da estrada contribuem para uma não homogeneidade das características geométricas do traçado. Estes fatores, considerados na conceção do método, contribuem para a produção de traçados com características geometrias adequadas e semelhantes às encontradas no mundo real.

7.2.3 Traçado em perfil longitudinal

Para o desenvolvimento do traçado em perfil longitudinal, é necessário primeiro fazer um levantamento altimétrico do terreno ao longo do trajeto da estrada. Em função do relevo do terreno e do traçado em planta da estrada definem-se os trainéis do perfil longitudinal. Na figura 7.13, apresenta-se o relevo do terreno (verde) ao longo do trajeto da estrada nacional (preto).



Figura 7.13 Relevo do terreno e trainéis da estrada nacional.

Os pontos assinalados a vermelho na figura 7.13 correspondem aos vértices dos trainéis definidos para o traçado da estrada nacional. Para melhor analisar as características geométricas do traçado em altimetria, na tabela 7.17, apresenta-se um excerto dos dados de projeto relativos ao desenvolvimento do traçado em perfil longitudinal para a estrada nacional.

Tabela 7.17 Dados do traçado em perfil longitudinal (nacional).

id	Trainéis			Concordâncias					
	Início (m)	i (%)	L trainel (m)	Início (m)	i1 (%)	i2 (%)	Δi (%)	Raio concord. (m)	D concord. (m)
...
6	3399.39	0.89	984.00	4383.39	0.89	-0.12	1.01	5000	50.43
7	4433.83	-0.12	790.00	5223.82	-0.12	-0.75	0.63	5000	31.63
8	5255.46	-0.75	693.00	5948.45	-0.75	-4.27	3.51	5000	175.74
9	6124.20	-4.27	621.00	6745.19	-4.27	2.03	-6.30	-5000 ⁽¹⁾	314.76
10	7059.96	2.03	758.00	7817.95	2.03	-4.72	6.75	5000	337.55
11	8155.51	-4.72	386.00	8541.50	-4.72	5.05	-9.78	-3790 ⁽¹⁾	370.50
12	8912.01	5.05	634.00	9546.00	5.05	-0.11	5.16	5000	258.21
13	9804.22	-0.11	651.00	10455.2	-0.11	4.47	-4.59	-5000 ⁽¹⁾	229.32
14	10684.54	4.47	315.00	10999.5	4.47	1.12	3.35	5000	167.56
15	11167.09	1.12	574.00	11741.0	1.12	-1.03	2.15	5000	107.62
16	11848.71	-1.03	830.00	12678.71	-1.03	2.47	-3.50	-5000 ⁽¹⁾	174.97
17	12853.68	2.47	591.00	13444.68	2.47	-4.37	6.84	5000	341.84
18	13786.52	-4.37	390.00	14176.52	-4.37	1.56	-5.93	-5000 ⁽¹⁾	296.50
...

(1) Raio negativo, corresponde a uma concordância concava (secção 3.5.2).

Como referido anteriormente, também se desenvolveu o traçado de uma estrada do tipo autoestrada. Na figura 7.14, apresenta-se a cota do terreno (verde) ao longo do trajeto da autoestrada (azul).

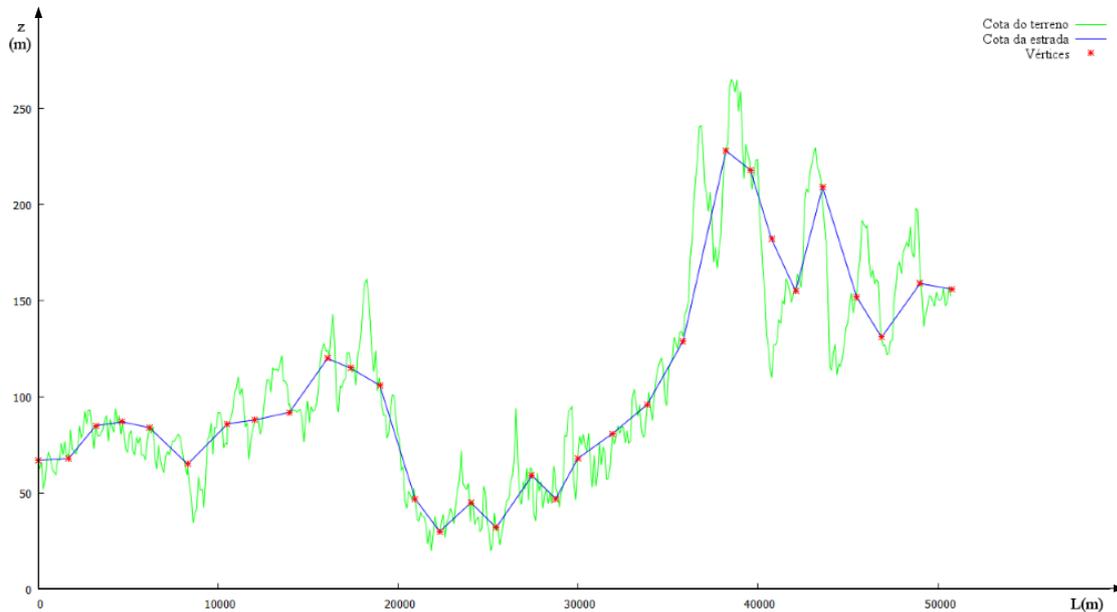


Figura 7.14 Relevo do terreno e trainéis da autoestrada.

Os pontos assinalados a vermelho na figura 7.14 correspondem aos vértices dos trainéis definidos para a autoestrada. Na tabela 7.18, apresenta-se um excerto dos dados de projeto relativos ao desenvolvimento do traçado em perfil longitudinal para a autoestrada.

Tabela 7.18 Dados do traçado em perfil longitudinal (autoestrada).

id	Trainéis			Concordâncias					
	Início (m)	i (%)	L trainel (m)	Início (m)	i1 (%)	i2 (%)	Δi (%)	Raio concord. (m)	D concord. (m)
1	0	0.06	1495.00	1495.00	0.06	1.15	-1.10	-35000 ⁽¹⁾	383.47
2	1878.47	1.15	1102.00	2980.47	1.15	0.14	1.01	35000	354.92
3	3335.38	0.14	1181.00	4516.38	0.14	-0.20	0.34	35000	120.10
4	4636.48	-0.20	1299.00	5935.48	-0.20	-0.90	0.70	35000	244.66
5	6180.14	-0.90	1659.00	7839.14	-0.90	0.96	-1.86	-35000 ⁽¹⁾	650.47
6	8489.61	0.96	1723.00	10212.61	0.96	0.13	0.82	35000	288.49
7	10501.10	0.13	1346.00	11847.10	0.13	0.21	-0.08	-35000 ⁽¹⁾	27.21
8	11874.32	0.21	1687.00	13561.32	0.21	1.34	-1.13	-35000 ⁽¹⁾	395.40
9	13956.72	1.34	1586.00	15542.72	1.34	-0.40	1.74	35000	608.34
10	16151.06	-0.40	921.00	17072.06	-0.40	-0.57	0.17	35000	60.78
11	17132.84	-0.57	1150.00	18282.84	-0.57	-3.06	2.49	31582	787.50
12	19070.34	-3.00	1222.00	20292.34	-3.00	-1.30	-1.70	-35000 ⁽¹⁾	616.09
...

(1) Raio negativo, corresponde a uma concordância concava (secção 3.5.2).

Como exemplo, apresenta-se na figura 7.15 uma vista 3D do traçado rodoviário gerado para a autoestrada.

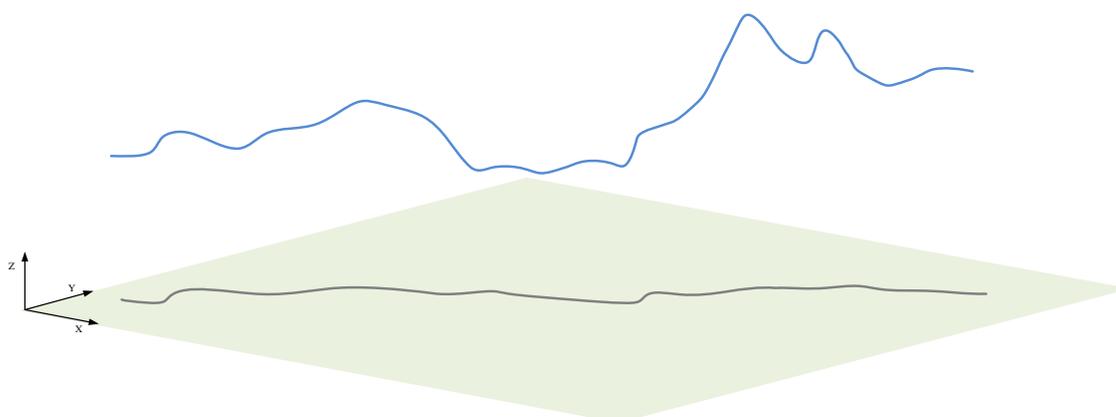


Figura 7.15 Vista 3D do traçado rodoviário da autoestrada.

Na figura 7.15, a linha azul representa o eixo da via da autoestrada, e a linha a cinza representa a projeção do traçado no plano horizontal xy.

Uma análise comparativa entre os perfis longitudinais da estrada nacional e da autoestrada pode ser conseguida através da representação sobreposta das altimetrias respetivas. Na figura 7.16, apresenta-se um excerto do traçado em perfil longitudinal da estrada nacional (preto) e do traçado em perfil longitudinal da autoestrada (azul).

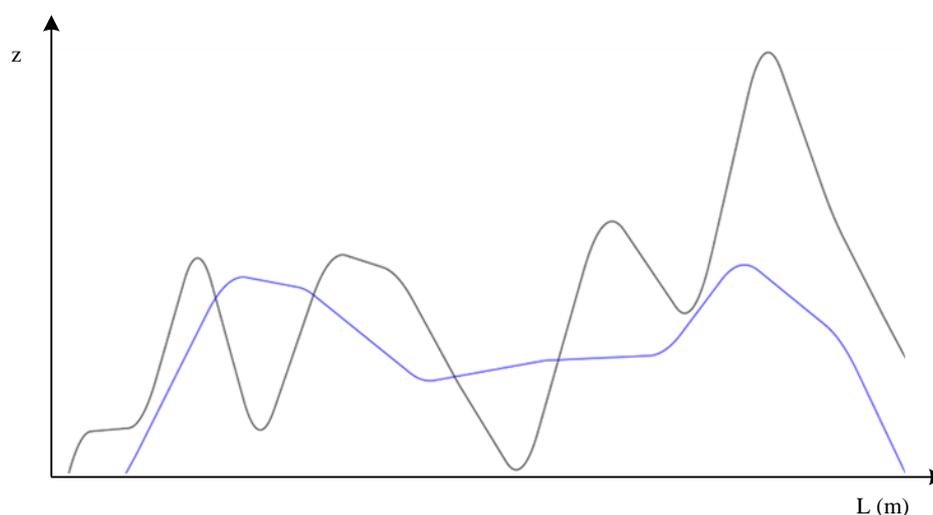


Figura 7.16 Traçados em altimetria da estrada nacional e autoestrada.

Como se pode observar pela figura 7.16, a variação do traçado em altimetria para a estrada nacional (média de $\Delta i=0.159$) é relativamente superior comparativamente com a variação do traçado em altimetria para a autoestrada (média de $\Delta i=0.09$). Isto deve-se não só ao facto de na estrada nacional existirem mais trainéis resultado do traçado em planta, permitindo uma maior aproximação ao relevo do terreno, mas também pelo facto

dos padrões geométricos para estradas deste tipo (velocidade de base de 60km/h) assim o permitirem.

Por outro lado, o traçado da autoestrada possui trainéis com uma extensão superior, não permitindo uma aproximação tão fina ao relevo do terreno. As normas de traçado para este tipo de via, permite trainéis com extensões superiores e obriga a que estas tenham inclinações mais suaves, permitindo assim uma maior comodidade na descrição do trajeto pelos condutores.

O método concebido permite obter de forma rápida e eficiente qualquer tipo de traçado rodoviário. Na tabela 7.19, apresentam-se os tempos medidos, após conhecer a definição topológica da ligação, na obtenção de traçados de estradas com diferentes extensões.

Tabela 7.19 Tempos de geração de traçados rodoviários.

Extensão (m)	Especialista de vias	Modelador interativo (<i>Road Designer</i>)	Método proposto (seg)
1000	1 dia	3 horas	3.42
10000	12 dias	5 horas	19
50000	3 meses	20 horas	52

Os valores apresentados na tabela 7.19 para as duas primeiras abordagens foram obtidos através de consultas a especialistas da área de projeto de estradas e consultar um especialista no uso do modelador interativo *Road Designer*⁸. Por último, os valores apresentados na terceira coluna, correspondentes ao método proposto e foram medidos em laboratório em ensaios experimentais dedicados.

Analisando o tempo necessário para obtenção de um traçado, conclui-se que o método proposto permite uma redução significativa no tempo necessário, mesmo quando comparado com outras abordagens semelhantes (Galín, 2010). A redução de tempo é tanto mais significativa quanto maior for a extensão da estrada ou rede de estradas em preparação, como também discutido em (Campos, 2015b).

Sumário

Nesta secção (7.2) foram apresentados os resultados obtidos nas diferentes etapas de geração de um traçado rodoviário, desde a geração dos corredores, definição do traçado em alinhamentos retos, traçado em planta, até à definição do traçado em perfil longitudinal.

Para demonstrar as potencialidades do método concebido, foram apresentados os resultados obtidos para um traçado do tipo estrada nacional e para um traçado do tipo autoestrada. Efetuando uma análise aos dados de projeto destas estradas pode-se avançar

⁸ www.vires.com/docs/Rod201306.pdf

que os modelos produzidos cumprem as normas de traçado e possuem características geométricas adequadas às respetivas tipologias.

Os trainéis em perfil longitudinal apesar de cumprirem a inclinação máxima em casos pontuais podem não garantir o cumprimento da inclinação mínima segundo as normas portuguesas de traçado (InIR, 2010). O não cumprimento pontual da inclinação mínima não é preocupante, pois apenas poderia levantar questões de drenagem das águas pluviais. Uma forma de compensar a falta de inclinação mínima dos trainéis passa pela especificação da sobrelevação, à semelhança do que acontece em traçado real.

Foi realizada uma análise comparativa de tempo entre diferentes abordagens para obtenção de traçados rodoviários de estradas, apresentada na tabela 7.19. Efetuando uma análise aos valores obtidos conclui-se que o método proposto reduz significativamente o tempo e consequentemente os custos na elaboração de traçados rodoviários.

7.3 Ambiente rodoviário

Após a geração da definição do traçado para cada uma das estradas referidas anteriormente, autoestrada e estrada nacional, procedeu-se à geração dos respetivos modelos visuais. Na figura 7.17, apresentam-se duas vistas do ambiente rodoviário gerado para a estrada nacional (velocidade base de 60 km/h).



Figura 7.17 Ambiente rodoviário da estrada nacional.

Como se pode ver pelas imagens da figura 7.17, foi gerada uma via rodoviária com dois sentidos de circulação. Integradas no modelo do ambiente rodoviário estrada, foram colocadas diversas árvores ao longo do traçado da estrada, instanciando modelos previamente modelados. Também se pode ver a colocação de sinalização e outros veículos no ambiente de simulação.

Na figura 7.18, apresenta-se um ambiente rodoviário gerado com perfil de autoestrada (velocidade de base de 120 km/h).

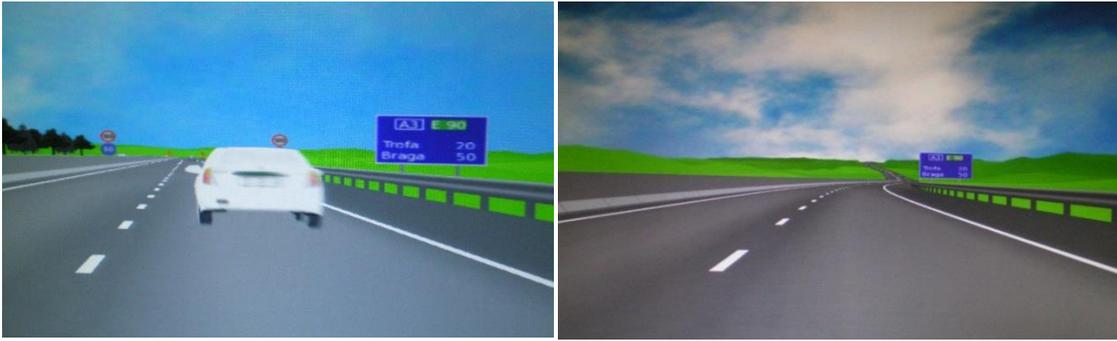


Figura 7.18 Ambiente rodoviário da autoestrada.

Como se pode ver nas imagens da figura 7.18, foram gerados modelos visuais com duas faixas com sentidos opostos e com duas vias de circulação no mesmo sentido em cada faixa. O traçado é pouco sinuoso tanto em planta como em perfil longitudinal. Associado ao modelo da estrada foram colocadas guardas de proteção e separador central composto por blocos normalizados do tipo *Jersey*.

A sinalização horizontal é colocada no ambiente rodoviário por marcas no pavimento. Estas marcas, como referido na secção 6.6.2 correspondem a tiras poligonais com cor desenhadas sobre o pavimento, como se ilustra na figura 7.19.



Figura 7.19 Ambiente rodoviário com sinalização de trânsito.

Nas imagens da figura 7.19 também se pode ver a colocação de sinalização vertical, instanciando objetos 3D previamente modelados.

A inclusão de atores no ambiente rodoviário e a parametrização de eventos de tráfego é realizada recorrendo à descrição semântica previamente gerada. Na imagem da figura 7.20 apresenta-se um cruzamento de estradas, onde se podem também observar outros veículos.



Figura 7.20 Ambiente de simulação com veículos.

A adequação do modelo de terreno é realizada após conhecer a definição do traçado de cada estrada, podendo dessa tarefa resultar taludes de aterro ou escavação, produzindo modelos de ambientes rodoviários semelhantes aos que se encontram no mundo real. Na figura 7.21, apresentam exemplos de taludes de escavação e aterro.

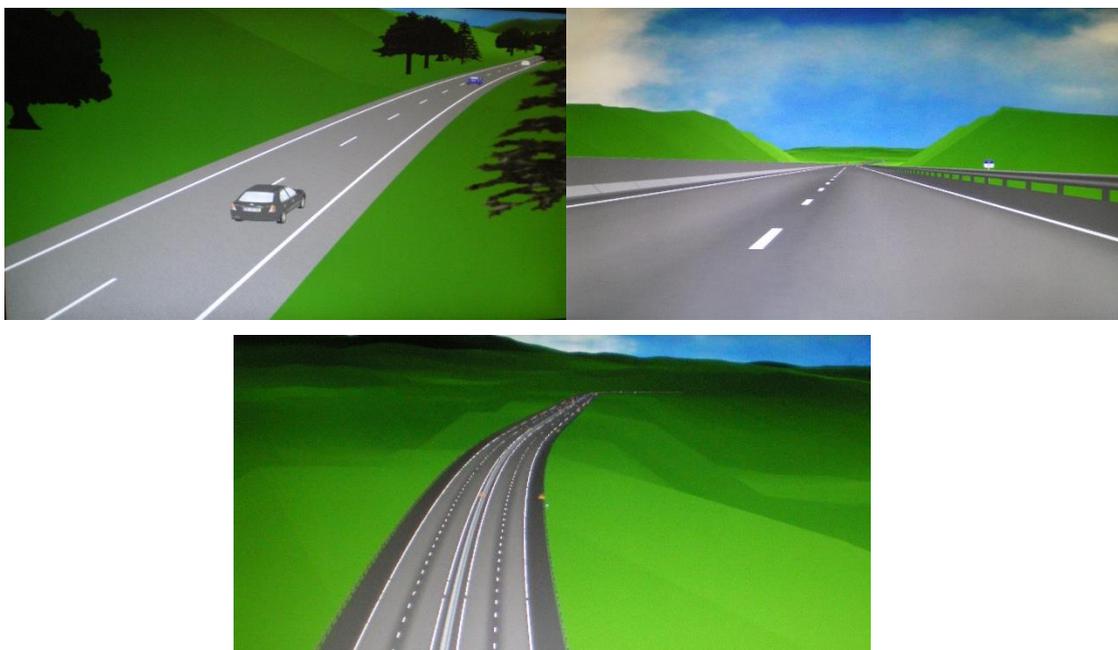


Figura 7.21 Ambiente rodoviário com taludes de escavação e aterro.

Como se pode ver nas imagens da figura 7.21, a definição do terreno foi editada em conformidade com a definição do traçado de cada estrada.

Sumário

Como referido na secção 6.6.1 o modelo visual da via é obtido por uma tira poligonal ao longo do traçado. Sobre essa tira é posteriormente mapeada uma textura conferindo um maior realismo ao modelo visual gerado.

Para complementar o modelo visual da via é colocada sinalização horizontal, caracterizada por marcas rodoviárias no pavimento e sinalização vertical, instanciando objetos 3D previamente modelados. Adicionalmente podem ser instanciados outros

objetos, como árvores ou sinalização informativa, enriquecendo o ambiente rodoviário e tornando-o mais realista.

O modelo de terreno é editado de acordo com o traçado de cada estrada produzindo modelos visuais realistas. Os modelos visuais gerados possuem a qualidade requerida para a realização de experiências de simulação de condução em tempo real para fins científicos.

7.4 Modelo de ambiente rodoviário

Como referido na secção 5.5, a descrição de um ambiente rodoviário encontra-se organizada nas seguintes definições: rede; corredores; eixos das vias em planta e em perfil longitudinal; perfis transversais das estradas; sinalização horizontal e vertical, e definição do modelo do terreno.

A preparação de um modelo de ambiente rodoviário começa pela geração da definição dos nós de ligação e geração da definição topológica da rede de estradas. Um exemplo da definição topológica da rede gerada é apresentado na tabela 7.3 da secção 7.1.

A partir da definição topológica da rede rodoviária, para cada ligação, é criada com um nível de detalhe crescente uma definição do traçado dos corredores. Em cada nível é gerada uma definição do traçado do corredor resultante. No final do processo de geração de corredores, obtém-se uma definição do traçado em alinhamentos retos, com o detalhe adequando ao desenvolvimento do traçado em planta. Na tabela 7.20, apresenta-se um extrato da definição final do traçado em alinhamentos retos.

Tabela 7.20 Definição do traçado em alinhamentos retos (m).

x	y	z
...
28046.06	17437.50	67.0
29055.58	18822.25	68.0
28927.90	20318.34	85.0
28434.71	21694.76	87.0
29216.58	22998.84	84.0
30427.29	24739.87	65.0
30856.65	26906.24	86.0
31507.19	28276.92	88.0
31561.14	30206.20	92.0
32687.94	31990.62	120.0
...

Após a definição do traçado em alinhamentos retos, desenvolve-se o traçado em planta com a introdução das curvas compostas. Na tabela 7.21, apresenta-se um excerto da descrição do traçado em planta.

Tabela 7.21 Descrição do traçado em planta (m).

		Início	Fim	Extensão
	
Reta		6125.05	6503.71	378.66
Curva	Clotóide (A=160)	6503.71	6532.05	28.34
	Arco (R=903)	6532.05	7291.00	758.95
	Clotóide (A=160)	7291.00	7319.34	28.34
Reta		7319.34	7658.07	338.73
Curva	Clotóide (A=160)	7658.07	7701.32	43.25
	Arco (R=592)	7701.32	8292.33	591.01
	Clotóide (A=160)	8292.33	8335.60	43.25
Reta		8335.60	8425.67	90.08
Curva	Clotóide (A=160)	8425.67	8446.16	20.48
	Arco (R=1250)	8446.16	9028.30	582.14
	Clotóide (A=160)	9028.30	9048.78	20.48
...

Depois de obter a definição do traçado em planta procede-se ao desenvolvimento do traçado em perfil longitudinal. Na tabela 7.22, apresenta-se um excerto da descrição do traçado em perfil longitudinal.

Tabela 7.22 Descrição do traçado em perfil longitudinal (m).

	Início	Fim	Extensão	Sinal

Trainel	6124.20	6745.19	621.00	-
Concordância (R= -5000)	6745.19	7059.96	314.76	-
Trainel	7059.96	7817.95	758.00	+
Concordância (R=5000)	7817.95	8155.51	337.55	+
Trainel	8155.51	8541.50	386.00	-
...

Sinal negativo: trainel em decida/concordância côncava (secção 3.5.2).

Um ambiente de simulação, no simulador de condução DriS é especificado num ficheiro com a extensão wdf (*World Description File, WDF*), como referido na secção 2.1.3. Na tabela 7.23, apresenta-se um extrato da especificação de um ambiente de simulação.

Tabela 7.23 Especificação de um ambiente de simulação.

```
;% WDF2.0%
; WDF : World Description File
; -----
;modelo.wdf
;
; (c) ISEP, FEUP
; -----
DEF_POLYLINES
    auto120_exp22out.pts OPEN
    auto120_exp22out_SE.pts OPEN
    auto120_exp22out_p1.pts OPEN
    auto120_exp22out_p3SC.pts OPEN
...
END_POLYLINES

DEF_ROAD A3_2014
    CENTERLINE auto120_exp22out.pts
    ROADSIGNS auto120_exp22out.sdf
    PERFIL auto120_exp22out
    TYPE AE
END_ROAD

DEF_TERRAIN
    MODEL ASTGTM2_N41W009.bt
    MODELATTR ASTGTM2_N41W009.attr
END_TERRAIN

; Movimento guiado com o volante

DEF_MOVEMENT Guiado
    CLASS TMOV_DRIVE
    ROAD a3_2014
    MODEL toyota
END_MOVEMENT

DEF_MOVEMENT MovCarroAmb
    CLASS TMOV_POLYLINE
    SPEED 22.44
    OFFSET 0
    FILE auto120_exp22out_p1.pts
    START 0.0
END_MOVEMENT

OBJECT CarroAmb
    MOVEMENT MovCarroAmb
    MODEL hyundai_gray
END_OBJ
...
```

A definição de um ambiente de simulação no ficheiro wdf encontra organizado em diferentes secções. No exemplo apresentado na tabela 7.23, na secção *DEF_ROAD*, é instanciada uma estrada. Nesta secção pode-se ver identificada a definição do traçado, a definição do perfil transversal e a definição da sinalização. Na tabela 7.24, apresenta-se um exemplo da especificação de um perfil transversal.

Tabela 7.24 Especificação do perfil transversal.

```
;%DEF2.0%
; DEF : Description File

DEF_PERF auto120_exp22out
    OFFSET 0.0
    WIDTH 24.6
    PERFINIT 0.0
    PERFEND 60000.0
    SURFACE AutoEstrada
    SPEED 120.0
END_PERF
...

```

Na tabela 7.25, apresenta-se um exemplo da especificação da sinalização.

Tabela 7.25 Especificação da sinalização horizontal e vertical.

<pre>;%SD2.0% ; SDF : Signals Description File #define BRANCO 0.8 0.8 0.8 #define AMARELO 0.2 0.2 0.2 ... DEF_SEPARATOR LATDIST 1.3 LINE (C , 0.12 , 0.0 , 50000.0 , BRANCO) END_SEPARATOR ... ; Sinais DEF_SIGN LATDIST 13.0 LONGDIST 17.0 ZROT 0.0 MODEL Limite120AE END_SIGN DEF_SIGN LATDIST 14.0 LONGDIST 50.0 ZROT 0.0 MODEL Info_L1_A3 END_SIGN </pre>	<pre>; Rails ... DEF_OBJREP LATDIST 12.3 INTERREP 4.05 INITREP 0.0 ENDREP 50000.0 ZROT 0.3 MODEL Rail_Jersy END_OBJ DEF_OBJREP LATDIST 45.0 INTERREP 150.0 INITREP 100.0 ENDREP 50000.0 ZROT 0.0 MODEL ArvoreT1 END_OBJ ... END </pre>
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

O traçado de uma estrada é representado ao longo do eixo da via por uma sequência de vértices. No exemplo da tabela 7.23, na secção *DEF_ROAD*, é identificada a definição do eixo da via definida por uma sequência de vértices (*auto120_exp22out.pts*). Na tabela 7.26, apresenta-se um extrato da definição do eixo da via representado por uma sequência vértices.

Tabela 7.26 Representação do eixo da via (vértices).

x	y	z	h	p	r
...
28687.34	18317.65	67.64	0.0	0.0	1.538
28687.92	18318.46	67.64	0.0	0.0	1.558
28688.50	18319.28	67.64	0.0	0.0	1.578
28689.08	18320.09	67.64	0.0	0.0	1.598
28689.66	18320.91	67.64	0.0	0.0	1.618
28690.24	18321.72	67.64	0.0	0.0	1.639
28690.82	18322.54	67.64	0.0	0.0	1.659
28691.40	18323.35	67.64	0.0	0.0	1.679
28691.97	18324.17	67.65	0.0	0.0	1.699
28692.55	18324.99	67.65	0.0	0.0	1.719
28693.13	18325.80	67.65	0.0	0.0	1.739
28693.71	18326.62	67.65	0.0	0.0	1.759
28694.28	18327.44	67.65	0.0	0.0	1.779
28694.86	18328.25	67.65	0.0	0.0	1.800
28695.43	18329.07	67.65	0.0	0.0	1.820
...

A identificação do modelo de terreno também é realizada no ficheiro de definição do ambiente rodoviário wdf, na secção *DEF_TERRAIN*. Dependendo dos requisitos de cada trabalho experimental, pode incluir a parametrização de outros veículos. Podem ser definidos diversos tipos de movimentos, como referido em (Leitão, 2000). A parametrização de eventos de tráfego específicos e a colocação de outros veículos também é realizada no ficheiro de descrição do ambiente de simulação (wdf).

Como exemplo, na tabela 7.23, a instanciação de um veículo no ambiente de simulação é realizada na secção *DEF_MOVEMENT*. Neste exemplo, é especificado um movimento do tipo *TMOV_POLYLINE*, que se caracteriza por seguir uma trajetória pré-programada, definida no ficheiro *auto120_exp22out_p1.pts*. Neste caso corresponde a um veículo a circular na via da direita do modelo autoestrada. Este veículo tem uma velocidade pré-programada de 22,44 m/s, especificada na etiqueta *SPEED*. Adicionalmente à definição do movimento é associado um modelo 3D de um carro (*hyundai_gray*), especificado na secção *OBJECT*.

Sumário

Nesta secção apresentou-se um exemplo prático da especificação de um ambiente rodoviário completo, desde a definição do traçado dos corredores, traçado em alinhamentos retos, até à definição do modelo de simulação com a inclusão de outros veículos.

A estrutura concebida para a definição de um ambiente rodoviário permite de forma simples e intuitiva a consulta e edição, da especificação gerada procedimentalmente, pelo preparador do modelo.

A definição semântica gerada na preparação de um ambiente rodoviário permite de forma fácil e rápida a parametrização de eventos de tráfego e a colocação de atores no ambiente de simulação.

Com a realização deste trabalho, contribui-se de forma significativa para a melhoria do processo de preparação de ambientes para o simulador de condução, reduzindo assim o tempo e o custo na sua preparação.

Avaliação

No sentido de validar o método proposto para a geração procedimental de ambientes rodoviários, foi realizada uma avaliação aos modelos produzidos pelo protótipo implementado, descrito no capítulo 6.

Para avaliar os traçados das estradas geradas procedimentalmente foi realizada uma análise de sinuosidade. Recorrendo a indicadores específicos estudados no âmbito deste trabalho, analisou-se a sinuosidade dos traçados gerados procedimentalmente comparativamente com traçados de estradas reais.

Nesta secção apresentam-se também os resultados da avaliação experimental realizada no simulador de condução, recorrendo a especialistas da área de projeto. O trabalho experimental consistiu na análise de dados de projeto de traçados rodoviários gerados procedimentalmente e na avaliação qualitativa de modelos visuais, apresentados na simulação realizada pelos participantes. São também apresentados os resultados da avaliação experimental realizada por um grupo de estudantes, no âmbito de um projeto de investigação realizado recentemente no simulador de condução, que utilizou modelos rodoviários gerados procedimentalmente, pelo método apresentado neste trabalho.

A avaliação experimental realizada aos ambientes rodoviários gerados permitiu-nos validar e concluir que os resultados produzidos pelo protótipo implementado vão ao encontro dos objetivos inicialmente definidos, produzindo modelos de estradas com a qualidade esperada.

8.1 Sinuosidade do traçado

Como referido na secção 3.6, a percepção da sinuosidade de uma estrada depende das características geométricas do traçado rodoviário e da velocidade do objeto que viaja através dela.

A comodidade de um percurso pode estar diretamente relacionada com a sinuosidade do traçado. A extensão das retas, a extensão das curvas e o raio das curvas, são fatores que influenciam diretamente a classificação de sinuosidade de um traçado.

Nesta secção são apresentados os resultados de sinuosidade calculados segundo os indicadores: índice de sinuosidade, índice de curvatura e índice de curva. Adicionalmente é feita uma análise de sinuosidade no domínio da curvatura, recorrendo à transformada discreta de Fourier.

Nesta avaliação foram estudados os traçados gerados proceduralmente apresentados na secção 7.2, e que serão também analisados pelos especialistas na avaliação experimental (secção 8.2.1).

8.1.1 Índice de sinuosidade

O índice de sinuosidade de um traçado, definido na secção 3.6.1 relaciona a extensão atual da estrada com a distância mínima em linha reta. Na tabela 8.1, apresentam-se os valores de sinuosidade obtidos correspondentes aos traçados de autoestrada e estrada nacional analisados.

Tabela 8.1 Índice de sinuosidade dos traçados gerados.

	Estrada nacional	Autoestrada
<i>IS</i>	1.11	1.06

Estes valores dos índices de sinuosidade obtidos para os traçados gerados enquadram-se na mesma gama dos valores encontrados em traçados reais (nacional- 1.17, autoestrada- 1.11) (secção 3.6.1). Fazendo uma comparação entre os dois traçados gerados, verifica-se que a autoestrada apresenta um índice de sinuosidade inferior ao da estrada nacional. Esta diferença era esperada, uma vez que a autoestrada foi concebida para uma velocidade de base superior, devendo portanto oferecer uma melhor comodidade de circulação.

Se utilizarmos a escala de classificação para rios referida na secção 3.6.1, pode-se dizer que os traçados obtidos enquadram-se na classe de sinuosidade *Ondulado* ($1.05 \leq IS < 1.25$).

8.1.2 Índice de curvatura

O índice de curvatura descrito na secção 3.6.2 permite retirar algumas considerações relativamente ao desenvolvimento do traçado, uma vez que permite aferir numa

extensão de estrada se existem muitos ou poucos desvios de direção. Na tabela 8.2, apresentam-se os valores do índice de curvatura obtidos para os traçados gerados procedimentalmente.

Tabela 8.2 Índice de curvatura dos traçados gerados.

	Estrada nacional	Autoestrada
IC	2138.78	1085.52

Pelos dados apresentados na tabela 8.2, existe uma diferença clara entre o traçado da autoestrada e da estrada nacional. O IC obtido para o traçado da autoestrada, enquadra-se dentro do valor esperado sendo semelhante ao calculado para traçado real (853.78), como se discutido na secção 3.6.2.

O valor obtido para o traçado do tipo estrada nacional é ligeiramente inferior ao calculado para estradas reais (5406.76), apresentado na secção 3.6.2. Esta diferença é devida ao raio das curvas apresentar valores médios superiores, na ordem dos 997.04 m, comparativamente com os traçados reais analisados que possuem curvas com valores médios de raios da ordem dos 237.83 m. Entre outros aspetos o traçado ao permitir a especificação de raios superiores é devida aos ângulos de desvio entre os alinhamentos retos serem relativamente pequenos e inferiores aos dos traçados reais analisados.

8.1.3 Índice de curva

O índice de curva indica qual a percentagem do trajeto que é descrito em curva, comparativamente com a extensão total da estrada. Na tabela 8.3, apresentam-se os valores de índice de curva calculados para os traçados gerados procedimentalmente.

Tabela 8.3 Índice de curva dos traçados gerados.

	Estrada nacional	Autoestrada
I_{curva}	0.56	0.68

Analisando os dados apresentados na tabela 8.3, verifica-se que existe uma diferença no valor de índice de curva entre o traçado da autoestrada e o traçado da estrada nacional. O valor de índice de curva para a autoestrada enquadra-se dentro dos valores esperados para este tipo de traçado, uma vez que o valor obtido para traçados reais deste tipo é próximo de 0.77 (secção 3.6.3). O valor de índice de curva para o traçado da estrada nacional, é ligeiramente superior ao valor obtido para traçados reais, $I_{curva}=0.47$ (secção 3.6.3). Esta diferença é devida ao facto do traçado gerado possuir curvas com um desenvolvimento médio superior, na ordem dos 478.37 m, comparativamente com os traçados reais analisados com desenvolvimentos de curva da ordem dos 265.34 m. Tal como acontece no índice de curvatura, esta diferença é justificável pelo facto do traçado

em alinhamentos retos permitir a especificação de raio superiores, traduzindo-se em desenvolvimentos totais em curva superiores aos dos traçados reais.

8.1.4 Análise no domínio da curvatura

A transformada discreta de Fourier (*Discrete Fourier Transform, DFT*) permite analisar a sinuosidade de uma estrada no domínio da curvatura (m^{-1}) pela sua decomposição em séries de funções sinusoidais. A transformada discreta de Fourier, foi aplicada a uma definição de traçado representada pelo seno da orientação ($\sin(\theta)$), como descrito na secção 3.6.4.

No gráfico da figura 8.1, apresenta-se a análise no domínio da curvatura, para o traçado da estrada nacional gerada proceduralmente e analisada na secção de resultados.

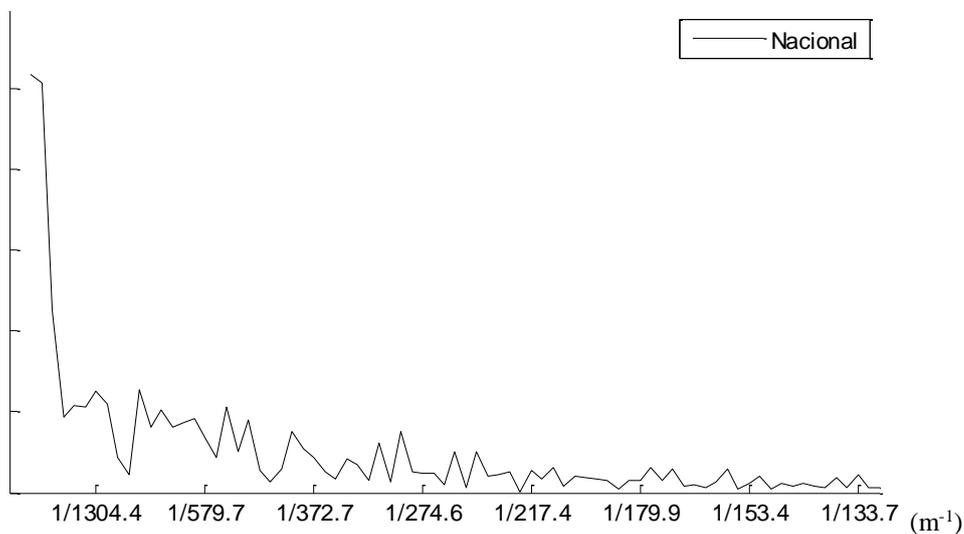


Figura 8.1 DFT para o traçado da estrada nacional gerada.

Como se pode ver pelo gráfico da figura 8.1, a transformada de Fourier, para a estrada nacional, apresenta amplitudes com significado entre as curvaturas de $1/1304.4 m^{-1}$ e de $1/217.4 m^{-1}$, confirmando a tendência espectável de utilização mais frequente de curvas com raios na gama de 200 m a 1300 m.

No gráfico da figura 8.2, apresenta-se a análise do mesmo tipo, para o traçado da autoestrada gerada proceduralmente e analisada na secção de resultados.

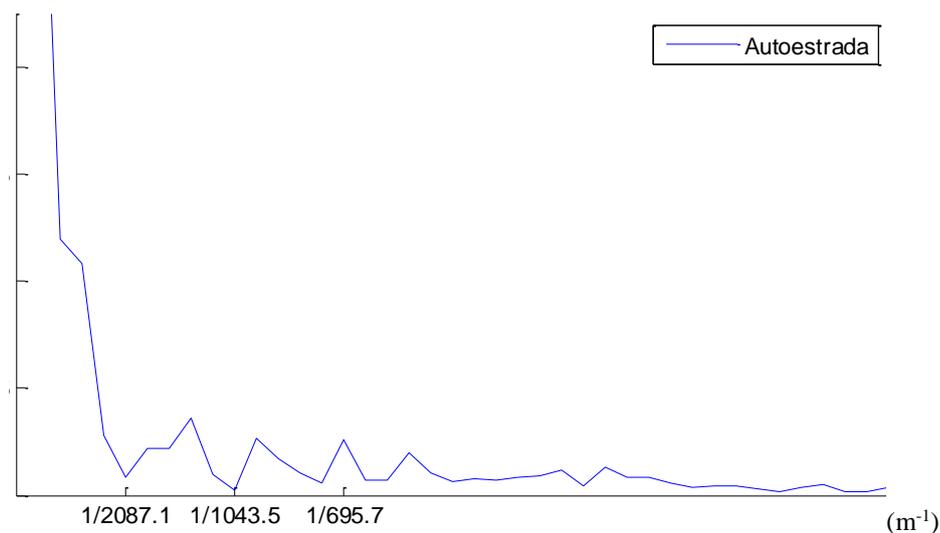


Figura 8.2 DFT para o traçado da autoestrada gerada.

Como se pode ver pelo gráfico da figura 8.2, para esta autoestrada, surgem amplitudes com significado entre a curvatura de $1/2087.1 \text{ m}^{-1}$ e a curvatura de $1/695.7 \text{ m}^{-1}$. O resultado da DFT para o traçado da autoestrada, confirma a tendência expectável de utilização mais frequente de raios de curvatura na gama de 700 m a 2500 m.

Sumário

Nesta secção foi apresentada a avaliação dos traçados gerados recorrendo a indicadores de sinuosidade. Os indicadores de sinuosidade utilizados foram: índice de sinuosidade, índice de curvatura e índice de curva. Adicionalmente, foi realizada uma análise de sinuosidade no domínio da curvatura recorrendo à transformada discreta de Fourier.

Pela análise dos resultados obtidos, relativos aos traçados gerados procedimentalmente, comparativamente com traçados reais, pode-se concluir que os traçados produzidos apresentam características de sinuosidade semelhantes a estradas reais. Esta análise permite concluir que os traçados gerados procedimentalmente vão ao encontro dos objetivos inicialmente definidos, a produção de traçados com características semelhantes aos encontrados no mundo real. No entanto, para uma validação mais focada nas características geométricas dos modelos de estradas obtidos, foi realizada uma avaliação experimental recorrendo a avaliadores externos, neste caso especialistas em projeto de vias de comunicação, cujos resultados se apresentam na secção seguinte.

8.2 Avaliação experimental

No sentido de avaliar, por meio externos, os traçados rodoviários gerados procedimentalmente foi realizada no simulador de condução uma avaliação experimental por especialistas na área de projeto de vias de comunicação. A avaliação realizada pelos especialistas envolveu a análise de dados de projeto dos traçados gerados

e a sua condução em simulador. Os resultados desta avaliação são apresentados na secção 8.2.1.

Foi também realizada no simulador de condução uma avaliação por um grupo de estudantes, no âmbito de um projeto de investigação que utilizou traçados gerados procedimentalmente pelo protótipo implementado. A avaliação realizada por este grupo visou a avaliação qualitativa dos modelos apresentados na simulação de condução. Os resultados desta avaliação são apresentados na secção 8.2.2.

8.2.1 Avaliação por especialistas

A avaliação experimental às características geométricas dos traçados gerados procedimentalmente contou com a participação de 9 especialistas em projeto de vias de comunicação. Todos os participantes possuíam os seguintes requisitos:

- Carta de condução;
- Conhecimentos em projeto de traçado;
- Competência prática na elaboração e análise de projeto de estradas.

Foi preparada uma entrevista guiada, a realizar aos participantes, com um conjunto de perguntas específicas relacionadas com os traçados analisados. Para o registo das respostas dadas pelos participantes, foi utilizada uma escala de pontuação de *Likert*, graduada de 1 (menos favorável) a 5 (mais favorável).

A avaliação experimental realizada em laboratório por especialistas compreendeu duas tarefas principais:

- Condução em simulador, percorrendo os modelos de estrada gerados;
- Análise de dados de projeto dos traçados experimentados no simulador.

Para este estudo foram utilizados dois ambientes rodoviários: uma autoestrada e uma estrada nacional, em que a ordem pela qual cada participante iniciava o ensaio foi aleatória. Cada participante realizou uma tarefa de condução num percurso de 20 quilómetros de autoestrada, projetada para uma velocidade de 120 km/h, estimando-se um tempo de condução de cerca de 10 minutos. Também conduziram num percurso de estrada nacional, projetada para uma velocidade de 60 km/h, numa extensão de 10 quilómetros, com um tempo estimado de condução de aproximadamente de 10 minutos.

Após cada tarefa de condução, os participantes efetuaram uma análise dos dados de projeto de cada um dos percursos realizados, estimando-se um tempo de análise de 10 minutos para cada traçado.

A análise dos traçados experimentados no simulador, sobre os dados de projeto, foi organizada nas seguintes etapas:

- Avaliação do método concebido para geração e escolha de alternativas de traçado dos corredores, e do traçado em alinhamentos retos;
- Análise das características geométricas dos traçados rodoviários gerados procedimentalmente, em planta e em perfil longitudinal;
- Avaliação qualitativa dos modelos visuais apresentados na simulação de condução.

8.2.1.1 Avaliação dos corredores

O principal objetivo desta análise é o de obter uma validação por parte dos especialistas em projeto de estradas sobre a escolha do traçado dos corredores. O método proposto para escolha do traçado dos corredores é independente do tipo de via e baseia-se essencialmente nas características do terreno, relevo e respetivas condicionantes. Neste tópico de avaliação experimental, foi realizada pelos especialistas a análise da geração do traçado dos corredores para a estrada nacional.

Para a validação do traçado dos corredores, foram feitas as seguintes perguntas:

- Q1, Concorda com a escolha dos traçados dos corredores?
- Q2, Concorda com a escolha final do traçado em alinhamentos retos?
- Q3, Concorda que o traçado dos corredores gerados tiveram em consideração a definição das condicionantes?
- Q4, Concorda que o traçado dos corredores gerados tiveram em consideração o relevo do terreno?

Nas tabelas 7.6 e 7.7 da secção 7.2.1, são apresentados os dados de projeto analisados pelos especialistas na escolha dos corredores e do traçado final em alinhamentos retos, que permitiram aos participantes responder às perguntas colocadas. O gráfico da figura 8.3 apresenta a frequência das classificações dadas pelos participantes para cada uma das perguntas feitas.

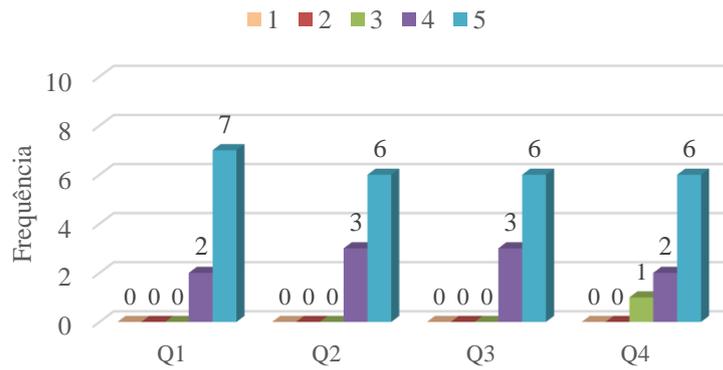


Figura 8.3 Avaliação do traçado dos corredores.

Analisando os resultados obtidos, pode-se afirmar que, para a maioria dos especialistas consultados o método concebido para a escolha dos corredores e do traçado em alinhamentos retos, produz modelos adequados, considerando o relevo do terreno e as condicionantes. Para este conjunto de perguntas, obteve-se uma classificação média global de 4.58 ($\sigma=0.089$).

Sumário

Relativamente à escolha do traçado dos corredores, foi expressa de forma clara uma concordância por parte dos participantes com o método concebido. Isto deve-se ao facto de o método apresentado, para além ter sido inspirado nos procedimentos utilizados em engenharia de vias, considera uma análise dos mesmos parâmetros que os estudados em projeto real.

Na escolha do traçado em alinhamentos retos também se verifica a obtenção de bons resultados, essencialmente devido ao facto de nesta fase de projeto também serem analisados essencialmente os mesmos parâmetros que os analisados em projeto de traçado real.

Na pergunta colocada sobre com a relação dos traçados produzidos com as condicionantes definidas, a generalidade dos especialistas expressou de forma clara a opinião que os traçados produzidos refletem a especificação de condicionantes.

A classificação obtida na pergunta relacionada com o relevo de terreno foi particularmente afetada pela dificuldade dos participantes efetuarem uma análise com rigor a este nível de detalhe, de aproximadamente 50 quilómetros de estrada. A este nível de abstração da definição do terreno e condicionantes, tal como acontece em projeto real, torna-se difícil analisar manualmente e com exatidão todo o traçado da estrada.

No entanto, o método concebido produz definições de traçado em alinhamentos retos adequadas às condicionantes impostas e à altimetria do terreno, como se pode constatar pela classificação atribuída pelos especialistas, na análise dos dados de projeto gerados.

De forma geral a definição do traçado dos corredores e do traçado em alinhamentos retos obtiveram excelentes classificações por parte dos especialistas consultados, validando assim o método concebido para a geração de traçado nesta fase de projeto.

8.2.1.2 Traçado da estrada

O método proposto permite a geração de qualquer tipo de traçado rodoviário, como por exemplo: autoestrada ou estrada nacional. Como referido anteriormente, no estudo experimental realizado, foram apresentados aos participantes os dados de projeto de dois tipos de traçados gerados procedimentalmente, um traçado de uma autoestrada e um traçado de uma estrada nacional.

Nesta análise foram formuladas as seguintes perguntas:

- Q1, Concorda que os raios utilizados no traçado em planta são adequados?
- Q2, Concorda que os parâmetros das clotoides são adequados?
- Q3, O traçado em planta possui boas características geométricas?
- Q4, Concorda que as inclinações dos trainéis são adequadas?
- Q5, Concorda que os raios das concordâncias são adequados?
- Q6, O traçado em perfil longitudinal possui boas características geométricas?
- Q7, Considera que existe uma boa coordenação entre traçado em planta e perfil longitudinal?
- Q8, Do ponto de vista de projeto, considera um traçado possível?

As respostas dadas pelos especialistas a estas perguntas resultam da análise aos dados de projeto dos traçados em planta da estrada nacional e da autoestrada, apresentados nas tabelas 7.15 (nacional) e 7.16 (autoestrada) da secção 7.2.2. As respostas às perguntas também envolveu a análise aos dados de projeto do traçado em perfil longitudinal da estrada nacional e da autoestrada, apresentados nas tabelas 7.17 (nacional) e 7.18 (autoestrada) da secção 7.2.3.

O gráfico da figura 8.4 apresenta a frequência das classificações dadas pelos participantes neste conjunto de perguntas para o traçado da estrada nacional.



Figura 8.4 Avaliação do traçado da estrada nacional.

Pelos dados apresentados, de forma geral pode dizer-se que este traçado obteve boa classificação em todos os tópicos analisados neste conjunto, com uma classificação média global de 4.54 ($\sigma=0.059$).

O gráfico da figura 8.5 apresenta a frequência das classificações dadas pelos participantes para o traçado do tipo autoestrada e para o mesmo grupo de perguntas.

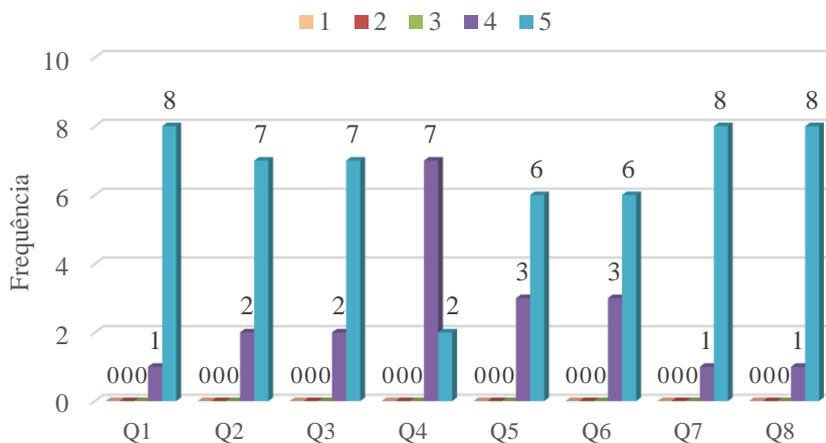


Figura 8.5 Avaliação do traçado da autoestrada.

Pelas classificações dadas pelos participantes às perguntas colocadas, pode-se afirmar que os traçados gerados possuem boas características geométricas em planta e em perfil longitudinal, obtendo-se uma classificação média global neste conjunto de perguntas de 4.72 ($\sigma=0.053$).

Durante a entrevista, algumas dúvidas foram levantadas pelos participantes, essencialmente relacionadas com a pergunta 1 (Concorda que os raios utilizados no traçado em planta são adequados?) e a pergunta 4 (Concorda que as inclinações dos

trainéis são adequadas?). Nos traçados analisados, apesar de os raios (R) das curvas estarem em conformidade com as normas de traçado, podem ser levantadas algumas questões de segurança rodoviária relativas à sequência dos raios aplicados. Esta questão surge quando no traçado de uma estrada aparece uma curva com raio reduzido, face ao trajeto previamente descrito pelos condutores. Nos traçados analisados, para a estrada nacional, esta situação surge na curva 14, em que os raios que antecedem a referida curva (14), apresentam um valor médio superior. Em projeto real, quando esta situação surge é tipicamente contornada com a colocação de sinalização vertical de aviso. À semelhança do que acontece em traçado real, neste caso, após a identificação da referida curva (14) no traçado da estrada nacional, foi colocada no modelo visual sinalização vertical de aviso, aproximação de curva perigosa, em ambos os sentidos. No âmbito deste trabalho, este aspeto não é preocupante e não se apresenta como negativo, uma vez que esta situação pode ser constatada em traçado real. Um dos objetivos deste trabalho é a geração procedimental de ambientes rodoviários semelhantes aos reais. Apesar de levantada esta questão, em mais de 60% das respostas dadas relativas ao traçado em planta foi atribuída a classificação máxima (5 na escala de *Likert*).

Relativamente ao perfil longitudinal foi levantada a questão da inclinação mínima dos trainéis. Este aspeto torna-se mais evidente em traçados do tipo autoestrada, pela suavidade do traçado em perfil longitudinal e pela extensão superior dos trainéis comparativamente com os da estrada nacional. Na implementação atual, existe a possibilidade de pontualmente ocorrerem situações em que o trainel não obedece à inclinação mínima, mas isto apenas significa que em projeto real poderia apresentar problemas de drenagem de águas pluviais. Tal como em projeto real, nos modelos gerados este problema é solucionado com a especificação de sobrelevação.

Sumário

Pelos dados de projeto dos traçados apresentados aos especialistas, estes atribuíram globalmente uma classificação muito boa. Esta avaliação teve como foco a análise das características geométricas do traçado em planta e em perfil longitudinal. Também foi atribuída uma boa classificação às perguntas colocadas relativamente aos aspetos de coordenação do traçado em planta e perfil longitudinal.

Pela análise das respostas dadas relativamente ao traçado em planta e em perfil longitudinal, pode-se concluir que os modelos obtidos procedimentalmente satisfazem globalmente os requisitos de projeto de vias, normas de traçado e as práticas correntes em projeto de vias.

Pelas respostas dadas à última pergunta (Q8), pode-se também concluir que os traçados apresentados possuem características geométricas semelhantes às de traçados produzidos por especialistas em projeto de estradas e semelhantes a traçados implementados na realidade.

8.2.1.3 Modelo visual

No sentido de avaliar a qualidade dos modelos rodoviários obtidos, foi colocado um conjunto de perguntas aos participantes. Tendo por base a condução realizada no simulador nos ambientes rodoviários gerados (nacional e autoestrada), e o ponto de vista do condutor, foram feitas as seguintes perguntas:

- Q1, Parece-lhe uma estrada real?
- Q2, A estrada apresenta boas características geométricas?
- Q3, Como classifica o modelo visual da estrada apresentado?

O gráfico da figura 8.6 apresenta a frequência das classificações dadas pelos participantes, ao conjunto de perguntas colocadas para o modelo da estrada nacional.

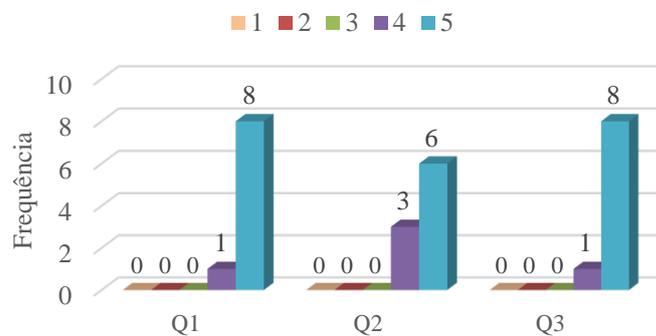


Figura 8.6 Avaliação do ambiente rodoviário da estrada nacional.

Numa primeira análise aos dados obtidos, pode-se concluir que o modelo de estrada nacional gerado é de excelente qualidade, obtendo-se uma classificação média global para este conjunto de perguntas de 4.81 ($\sigma= 0.077$).

O gráfico da figura 8.7 apresenta a frequência das classificações dadas pelos participantes, ao conjunto de perguntas colocadas para o modelo da autoestrada.

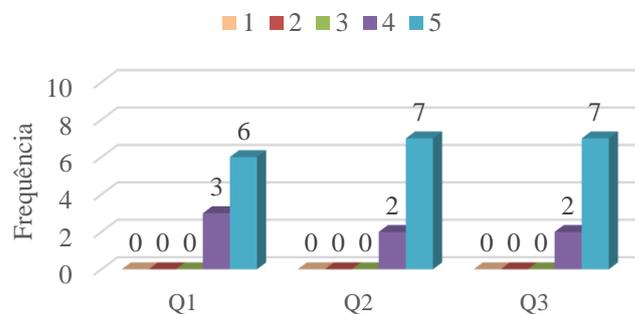


Figura 8.7 Avaliação do ambiente rodoviário da autoestrada.

Analisando as respostas dadas pelos participantes relativas a este tópico, verifica-se que os modelos de ambientes rodoviários apresentados obtiveram uma excelente classificação, obtendo-se uma classificação média de 4.74 ($\sigma= 0.087$).

Pelos resultados obtidos pode-se concluir que ambos os modelos gerados são apresentados com a qualidade esperada.

8.2.2 Avaliação por condutores jovens

Num estudo científico realizado recentemente no simulador de condução DriS, na área da conceção de interfaces de aviso ao condutor apresentado na seção 2.1.11, foi colocado um conjunto de perguntas aos participantes, relacionadas com os modelos gerados. Este estudo, realizado no simulador, envolveu o uso de modelos gerados proceduralmente pelo protótipo apresentado e tinha como objetivo obter uma avaliação qualitativa dos traçados gerados, dos modelos visuais apresentados e da experiência de condução no simulador. Este estudo tinha também como objetivo avaliar a consonância da resposta do condutor quando exposto as mensagens de informação de trânsito, sonora ou visual, reproduzidas pelo sistema de navegação embebido no carro.

O trabalho experimental foi dividido em duas fases. Numa primeira fase os participantes efetuaram um percurso de treino numa extensão de estrada com cerca de 6 km. Numa segunda fase, já em avaliação experimental, os participantes conduziram durante um percurso de estrada nacional com cerca de 10 km de extensão.

O grupo de estudo utilizado neste trabalho experimental era constituído por 26 participantes, essencialmente por estudantes do ensino superior, com uma média de idades de 24 anos. A amostra era maioritariamente do sexo masculino e todos eles com habilitação e experiência de condução.

Neste estudo foi utilizada uma escala de pontuação de *Likert*, graduada de 1 (menos favorável) a 6 (mais favorável), para registar as respostas dadas pelos participantes.

No decurso da realização do trabalho científico no simulador, fizeram-se algumas perguntas aos participantes, relacionadas com os modelos rodoviários mostrados em simulação. As perguntas apresentadas neste estudo foram as seguintes:

- Q1, Como avalia a semelhança da estrada utilizada com uma estrada real?
- Q2, Como classifica o realismo do ambiente virtual utilizado?
- Q3, Como classifica o realismo da experiência de condução?

O gráfico da figura 8.8 apresenta a frequência das classificações dadas pelos participantes, ao conjunto de perguntas colocadas.

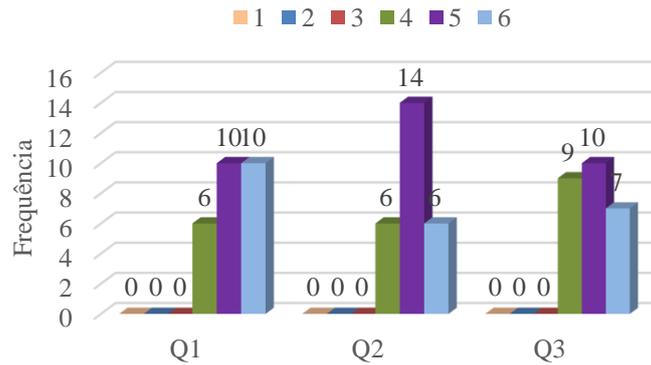


Figura 8.8 Avaliação dos ambientes e da simulação.

Pelas respostas obtidas às duas primeiras perguntas, pode-se concluir que os modelos rodoviários apresentados em simulação possuem características geométricas semelhantes a estradas reais e são apresentados com a qualidade visual esperada, obtendo-se uma classificação média global para estas duas perguntas de 5.5 ($\sigma=0.129$). Relativamente à experiência de condução, pode-se concluir que esta é realista, obtendo-se uma classificação média para esta pergunta de 5.3 ($\sigma=0.195$).

Esta avaliação permitiu aferir junto de um grupo maior de participantes, a qualidade dos modelos de ambientes rodoviários gerados e o realismo da experiência de condução, concluindo-se que o simulador de condução DriS proporciona experiências de condução simulada muito semelhante à real.

Conclusões finais

Os resultados obtidos com a realização deste trabalho experimental, envolvendo um grupo de especialista de projeto de vias e um grupo de estudantes, permite retirar algumas considerações finais:

- Os traçados gerados possuem características geométricas de acordo com as normas e as práticas comuns em projeto de estradas.
- Os traçados gerados mapeiam situações reais, com a utilização de raios típicos nas curvas em planta e nas concordâncias em perfil longitudinal.
- Os modelos de estradas gerados são adequados à realização de estudos científicos em simulador de condução.
- Os ambientes rodoviários gerados, na componente envolvente à estrada, possuem um nível de qualidade muito bom.
- A experiência de condução em simulador, nestes ambientes, traduz-se numa situação de condução muito próxima da real.

De uma forma geral, a realização do trabalho experimental veio trazer um contributo significativo na avaliação e validação dos modelos rodoviários gerados procedimentalmente pelo protótipo concebido, como também discutido em (Campos, 2015d).

8.3 Feedback dos participantes

A avaliação experimental realizada e descrita na secção 8.2 contemplou a realização de entrevistas aos participantes, proporcionando a informação adicional sobre os resultados obtidos. A informação recebida dos especialistas em projeto de vias de comunicação foi essencial para uma melhor perceção da qualidade dos traçados rodoviários gerados. Todo o grupo demonstrou bastante curiosidade em conhecer uma ferramenta de trabalho com elevado potencial como o simulador de condução DriS.

Relativamente ao simulador, foi referido que:

- Com o desenvolvimento atual que o simulador apresenta, este pode ser usado para o ensino, aprendizagem e treino de auditores na área da segurança rodoviária, proporcionando o estudo de pontos-chave em traçados gerados procedimentalmente ou mesmo traçados reais.
- O simulador apresenta-se como uma ferramenta a utilizar no estudo de traçados de estradas, não só na fase de estudo prévio como também em projeto de execução, possibilitando a deteção de pontos críticos.

Ao nível do trabalho experimental realizado, no que concerne à avaliação dos traçados apresentados, foi referido que:

- Na fase de geração do traçado dos corredores, a utilização de uma largura de referência para o perfil transversal é uma boa aproximação, à semelhança do que acontece em projeto real.
- O intervalo de amostragem de 10 metros, utilizado na análise da relação do traçado com o relevo do terreno e respetiva condicionantes é adequado. Em projeto real, na maioria dos casos não se consegue ter uma avaliação do traçado com o relevo do terreno e condicionantes com este pormenor.
- A escolha dos vértices em perfil longitudinal a partir dos vértices em planta é uma boa aproximação. Este método é também utilizado frequentemente em projeto real.
- O método utilizado para definir os parâmetros das curvas compostas, que consiste em fixar o valor do parâmetro (A) da clotóide para valores típicos e a partir deste retirar os restantes elementos da curva composta, raio (R) da curva e extensão (L) da clotóide, foi considerado adequado.

- No cálculo do perfil longitudinal, o método utilizado para definir os parâmetros das concordâncias verticais, que consistem em fixar o valor do raio (R_c) da concordância e a partir deste retirar os restantes elementos, como o desenvolvimento (D) da concordância vertical, foi também considerado adequado.

De uma forma geral, os modelos rodoviários produzidos e apresentados na simulação de condução causaram muito boa impressão nos participantes, especialistas e estudantes. O simulador foi considerado como uma ferramenta bastante útil para a realização de investigação científica em diversas áreas, em particular na área de engenharia de vias de comunicação, no campo da segurança rodoviária.

Conclusões e Trabalho Futuro

Experiências realistas de simulação de condução requerem a prévia preparação de modelos de ambientes rodoviários corretamente modelados e com características geométricas semelhantes às encontradas em traçado real. Tipicamente, ensaios experimentais poderão ter ainda como requisito que os ambientes sejam representativos do país ou região que se pretende simular.

Nesta dissertação apresentou-se o trabalho realizado no âmbito da conceção e implementação de um método integrado de preparação de modelos de ambientes rodoviários para realização de experiências científicas em simulação de condução. O método apresentado integra todos os passos de preparação de um ambiente, desde a definição dos nós de interligação, até à obtenção do modelo visual em simulador (Campos, 2015b).

Os métodos concebidos para a geração da rede e para a geração dos traçados das estradas foram inspirados nos procedimentos utilizados em projeto reais de vias de comunicação. A aplicação integrada destes métodos, permite a criação de ambientes rodoviários realistas e de elevada qualidade, de forma rápida e eficaz, reduzindo o recurso a especialistas da área de projeto de vias, quer na conceção da rede, quer na conceção dos traçados das estradas.

Para validar o método proposto de preparação integrada de ambientes rodoviários, foi desenvolvido um protótipo funcional capaz de gerar modelos completos aplicáveis ao simulador de condução DriS. O protótipo implementado permite a criação procedimental de qualquer ambiente rodoviário de grandes dimensões. A criação de um ambiente é realizada de forma integrada em diferentes fases: definição dos nós de ligação, definição topológica da rede, definição dos traçados das estradas, definição da sinalização, edição do modelo de terreno, e geração dos modelos geométrico e semântico.

Para validar os traçados produzidos, foi realizada uma avaliação recorrendo a indicadores de sinuosidade e à análise de dados de projeto por especialistas da área de vias de comunicação. Pelos resultados desta avaliação foi possível concluir que os traçados produzidos cumprem as normas de traçado e as práticas correntes em projeto de vias, apresentando características geométricas semelhantes às encontradas em estradas reais. A qualidade dos modelos de ambientes rodoviários produzidos, comprovada pela avaliação efetuada em simulador, proporciona a realização de estudos de condução simulada.

As vantagens comparativas da aplicação do método concebido sobre a modelação com ferramentas tradicionais são especialmente importantes quando se pretendem ambientes rodoviários complexos e de grandes dimensões, como comprovado pelas avaliações realizadas, apresentadas ao longo do capítulo 7.

9.1 Objetivos alcançados

A questão principal que se pretendeu investigar com este trabalho foi a seguinte:

Como se pode tornar mais expedito o processo de geração de ambientes rodoviários para simulação de condução?

Para tentar dar resposta a esta questão, propôs-se a seguinte hipótese:

*“Através da **modelação procedimental** e mapeando os métodos de **conceção e projeto** de estradas utilizados em **engenharia de vias**, é possível gerar modelos de **ambientes rodoviários** realistas e adequados à **simulação de condução em tempo real**”*

Os modelos obtidos pelo protótipo implementado, apresentados no capítulo 7, permitem comprovar esta hipótese e responder à questão central. Os resultados dos indicadores de sinuosidade estudados, a análise no domínio da curvatura realizada, assim como os resultados do trabalho experimental conduzido em laboratório recorrendo a especialistas da área de projeto de vias comunicação, apontam para aceitação da validade da hipótese colocada.

A análise de resultados efetuada permitiu demonstrar que os modelos gerados procedimentalmente pelo protótipo implementado cumprem os requisitos exigidos para a realização de trabalho experimental em simulador de condução nas mais diversas áreas científicas. A otimização de tempo e recursos empregues na preparação de ambientes rodoviários, observada na análise efetuada e apresentada na secção 7.2.3, mostra que o método concebido é mais eficiente do que as alternativas analisadas.

O método apresentado permite a geração procedimental de uma grande variedade de redes rodoviárias, reduzindo substancialmente o trabalho e o custo envolvido na

concepção de uma especificação. A obtenção procedimental da definição topológica de uma rede rodoviária é um contributo inovador na geração procedimental de redes rodoviárias realistas (Campos, 2015c).

O problema da geração de um traçado entre dois nós da rede é analisado de forma global, em diferentes níveis, com detalhe crescente, mapeando assim os procedimentos utilizados em engenharia de vias. A solução de corredor escolhida em cada nível de detalhe é determinada avaliando a relação do traçado com o relevo do terreno e as respetivas condicionantes, à semelhança do que acontece em projeto real. O processo de geração de traçados rodoviários, inspirado nos métodos utilizados em engenharia de vias, produz estradas corretamente projetadas, segundo as normas e as boas práticas em projeto de vias. Ao longo do processo de geração automática de estradas, as trajetórias vão sendo refinadas produzindo no final definições de traçado com o detalhe exigido para a geração do modelo geométrico (Campos, 2015a).

A introdução de curvas compostas no traçado em planta e a introdução de concordâncias verticais no traçado em perfil longitudinal são dois fatores de relevo que contribuem para o realismo dos traçados obtidos (Campos, 2014; Campos, 2015d). A geração procedimental de traçados rodoviários realistas, em planta e em perfil longitudinal, é sem dúvida um contributo inovador do presente trabalho, que permite minimizar o recurso a especialistas na concepção de traçados rodoviários de estradas, adequados à realização de estudos científicos em simulador.

A análise dos traçados gerados e dos modelos apresentados, por parte dos avaliadores, é francamente positiva. A análise dos resultados, permite constatar que os ambientes gerados pelo protótipo implementado demonstram possuir uma elevada qualidade. Esta conclusão deverá ainda ser reforçada com a produção de modelos a utilizar em diversos trabalhos experimentais no simulador. É expectável que o protótipo desenvolvido contribua para tornar mais expedita a preparação de ambientes rodoviários necessários para a realização de estudos científicos.

A possibilidade de gerar modelos a partir de dados de projeto permite detetar em simulador pontos fortes e pontos fracos de traçados ainda em fase de estudo prévio, antes de estes serem implementados em terreno real. No âmbito da segurança rodoviária, esta funcionalidade é também útil para o ensino e o treino de auditores na avaliação de projetos reais.

Adicionalmente, o método proposto gera uma descrição semântica de todo o modelo. Esta descrição é fundamental para a produção de relatórios correspondentes ao ensaio experimental, para a inclusão automática de atores no ambiente simulado e para parametrização de eventos de tráfego. A descrição semântica gerada pode ser exportada para outros sistemas que requeiram a consulta das definições relativas ao ambiente de simulação, como mencionado na secção 5.5.

O preparador do modelo poder interagir em qualquer fase do processo de geração de ambientes, editando as descrições semânticas geradas por cada um dos módulos, possibilitando responder aos requisitos específicos de cada ensaio experimental. Esta característica é um contributo significativo na preparação procedimental de ambientes rodoviários.

O protótipo funcional descrito no capítulo 6 já foi utilizado na criação de ambientes rodoviários para a realização de experiências científicas no simulador de condução DriS, demonstrando que a hipótese colocada do uso de métodos procedimentais para a preparação de modelos de ambientes rodoviários realistas adequados para simulação de condução, é viável.

No âmbito do trabalho de doutoramento de Reginaldo Schiavini, em Design pela Faculdade de Arquitetura da Universidade de Lisboa, foi desenvolvido um estudo com o objetivo de analisar a resposta dos utilizadores frente a uma tomada de decisão. Uma vez que este estudo requeria a utilização de ambientes rodoviários com traçados semelhantes aos reais, foi utilizado com sucesso o protótipo implementado.

No âmbito de um trabalho de investigação relacionado com ensino e certificação de competências de condução automóvel, foi identificada a necessidade de preparação de ambientes com traçados e eventos rodoviários realistas. Tal como acontece na maioria dos estudos científicos, o ensino da condução exige a utilização de estradas representativas dos ambientes habituais dos condutores participantes. Para a preparação do trabalho experimental e produção de modelos que cumprissem os requisitos do projeto, foi utilizado o protótipo desenvolvido, obtendo-se bons resultados.

9.2 Desenvolvimentos futuros

O protótipo implementado encontra-se num estado de desenvolvimento que se pode considerar funcional, no entanto existem melhoramentos que poderão ser equacionados.

O módulo de definição de terrenos, com a geração procedimental do relevo em que sejam considerados os efeitos da erosão e de outras causas ambientais, encontra-se em fase avançada de desenvolvimento, prevendo-se a sua integração no protótipo descrito nos próximos meses. Também se encontra em fase avançada de desenvolvimento uma versão melhorada do módulo de geração de nós de ligação que deverá distribuir os nós tendo em conta a definição do terreno, como zonas costeiras, cursos de água, entre outras características.

Em estudo estão também pequenos melhoramentos no módulo de geração do traçado rodoviário no sentido de responder às questões levantadas durante a avaliação experimental realizada com especialista da área de projeto. A resposta a grande parte destas questões passa por implementar pequenos melhoramentos no processo de escolha dos parâmetros das curvas em planta e em perfil longitudinal.

A geração do traçado em perfil longitudinal deverá ser melhorada, integrando a definição do terreno e respetivas condicionantes numa abordagem diferente na escolha dos vértices dos trainéis. Tal melhoramento implicará refazer parte do módulo de cálculo de traçado em perfil longitudinal.

Estão também equacionados melhoramentos ao nível da geração da sobrelevação, possibilitando obter sobrelevações a duas águas em reta, com transição gradual para sobrelevações em curva a uma água.

Esperam-se resultados promissores em termos de qualidade dos traçados decorrentes destes melhoramentos.

A preparação do ambiente rodoviário poderá ainda ser otimizada com o melhoramento do módulo de sinalização horizontal. Uma característica a considerar na sinalização horizontal seria a possibilidade de integração automática de setas de seleção. As setas de seleção são marcas pintadas no pavimento com o objetivo de orientarem o trânsito nas mudanças de direção e na transição de linhas descontínuas para linhas contínuas.

O modelo do ambiente rodoviário poderá ainda ser melhorado, através da modelação automática de interseções, cruzamentos e rotundas. As interseções poderão ainda ser classificadas em dois tipos: ao mesmo nível e desniveladas. Este contributo irá permitir a preparação de modelos de redes rodoviárias mais complexas, com interseções de estradas de diferentes tipologias.

Pela avaliação experimental realizada e apresentada na secção 8.2, concluiu-se que o aspeto visual do ambiente rodoviário pode vir a ser melhorado, povoando automaticamente o meio envolvente com mais elementos típicos do país ou região que se pretende simular.

O método implementado de organização do modelo visual do terreno pode também ser melhorado, incorporando técnicas de variação dinâmica do nível de detalhe, permitindo aumentar a performance e a qualidade da visualização de modelos terrenos de grandes dimensões.

O desenvolvimento de uma plataforma interativa pode ser considerado como um melhoramento não prioritário, que poderá aumentar a usabilidade do sistema por parte de utilizadores menos treinados.

No futuro próximo, os modelos produzidos por este protótipo serão utilizados em estudos na área de engenharia de vias de comunicação, mais propriamente na área da segurança rodoviária, pois permitem a realização de auditorias prévias de segurança rodoviária a traçados não construídos na realidade. Por outro lado, os modelos gerados permitem visualizar o espaço envolvente à plataforma da estrada, constituído normalmente pelos taludes de escavação e de aterro. Deste modo, é possível realizar estudos na área da prevenção de sinistralidade e da segurança rodoviária, que permitam

a avaliação do traçado e a deteção de secções da estrada onde os níveis adequados de segurança não estão garantidos.

O estudo do comportamento dos condutores em diversas situações de eventos de tráfego, condições da via e equipamento disponível, deverá continuar a ser uma área de investigação não esgotada durante muitos anos.

Referências Bibliográficas

- Aldrian, E., & Djamil, Y. S. (2008). Spatio-temporal climatic change of rainfall in East Java Indonesia. *International Journal of Climatology*, vol. 28, n.º 4, pp. 435-448.
- ArcGis, (2011). Definição de sinuosidade, disponível em:
<http://www.arcgis.com/home/item.html?id=00e708a448b74810a0e805c4a97f9d46>.
- Bayarri, S., Fernandez, M., & Perez, M., (1996). Virtual Reality for driving simulation, vol. 39, n.º 5, *Communications of the ACM*.
- Black, P, (2006). Dijkstra's algorithm, in *Dictionary of Algorithms and Data Structures*, disponível em:
www.nist.gov/dads/HTML/dijkstraalgo.html.
- Campos, C., Cunha, V., & Leitão, J., (2003). Geração de Ambientes Rodoviários para Simulação de Condução, 12º encontro Português de Computação Gráfica, pp. 143-147, Instituto Superior de Engenharia do Porto.
- Campos, C., Leitão, J.; Resende, A., & Rodrigues, C., (2007a). Instrumentação de Veículo Real para Simulação de Condução, *Engenharias' 07 – Inovação e Desenvolvimento*, vol. 2, pp. 30-34, ISBN:978-989-654-000-5, Covilhã, Universidade da Beira Interior.
- Campos, C., Leitão, J., & Rodrigues, C., (2007b). Modelação de Ambientes Rodoviários de Grandes Dimensões, 15.º Encontro Português de Computação Gráfica, pp. 19-28, Taguspark, Lisboa.
- Campos, C., Leitão, J., & Coelho, A., (2012a) Modelação Procedimental de Ambientes Rodoviários para Simulação de Condução, 20.º Encontro Português de Computação Gráfica, pp. 51-58, ISBN: 978-989-97491-5-3, Instituto Politécnico de Viana do Castelo.
- Campos, C., Leitão, J., & Coelho, A, (2012b). Modelação Procedimental de Ambientes Rodoviários para Simulação de Condução, TICs para el Aprendizaje de la Ingeniería, Capítulo 11, pp. 69-76, ISBN 978-84-8158-632-9, TICA 69.
- Campos, C., Leitão, J., & Coelho, A., (2014). Geração Procedimental de Traçados Rodoviários para Simulação de Condução, 21.º Encontro Português de Computação Gráfica, pp. 89-96, ISBN: 978-972-8793-71-5, Instituto Politécnico de Leiria.
- Campos, C., Leitão, J., & Coelho, A, (2015a). Building Virtual Roads from Computer made Projects, In *Proceedings of the 7th International Conference on Human-Computer Interaction*.
- Campos, C., Leitão, J., & Coelho, A, (2015b). Integrated Modeling of Road Environments for Driving Simulation, In *Proceedings of the 10th International Conference on Computer Graphics Theory and Applications*, pp. 70-80, (Grapp 2015), Berlin.
- Campos, C., Leitão, J., Pereira, J., Ribas, A., & Coelho, A., (2015c). Procedural Generation of Topologic Road Networks for Driving Simulation, In *Proceedings of the 10ª Conferência Ibérica de Sistemas e Tecnologias de Informação*, vol. 1, pp. 346-351, ISBN: 978-898-98434-4-8, Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Águeda.
- Campos, C., Leitão, J., & Coelho, A., (2015d). Procedural Generation of Road Paths for Driving Simulation, *International Journal of Creative Interfaces and Computer Graphics*, (aceite para publicação).
- Coelho, A., (1996). Integração de Som 3D em Simulação, tese para obtenção do grau de mestre, disponível em: <http://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/12062>.

- Coelho, A., Leitão, J., Ferreira, N., (1998) Síntese de Som 3Dem Ambientes de Realidade Virtual - Aplicação a Simuladores de Condução, 8º Encontro Português de Computação Gráfica (pp. 215-229), Coimbra, Portugal.
- Coelho, A., Bessa, M., Sousa, A. Augusto, & Ferreira F. Nunes, (2007). Expeditious modeling of virtual urban environments with geo spatial L-systems; Computer Graphics Forum, vol. 26, n.º 4, pp. 769–782.
- Chen, G., Esch, G., Wonka, P., Muller, P., & Zhang, E., (2008). Interactive Procedural Street Modeling, ACM SIGGRAPH.
- Baptista, R., Coelho, A., & Carvalho, C., (2013). Methodology for Creating a Competences Certification Correlation Matrix, 6th International Conference of Education, Research and Innovation (ICERI2013), ISBN 978-84-616-3847-5, Seville, Spain.
- Donikian, S., (1997). VUEMS: A Virtual Urban Environment Modeling System, Computer Graphics International, Proceedings. IEEE, pp. 84-92.
- Engstrom, I., Gregersen, N. P., Hernetkoski, K., Keskinen, E., & Nyberg, A., (2003). Young novice drivers, driver education and training. Literature review (No. Rapport 491A).
- França, A., (2011). Apontamentos de vias de comunicação, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Galin, E., Peytavie, A., Maréchal, N., & Guérin, E., (2010). Procedural Generation of Roads, EUROGRAPHICS, vol. 29, n.º 2, pp. 429-438.
- Galin, E., Peytavie, A., Guérin, E., & Benes, B., (2011). Authoring Hierarchical Road Networks, Pacific Graphics, vol. 30, n.º 7, pp. 2021-2030.
- Piccinini, G. B., Prati, G., Pietrantoni, L., Manzini, C., Rodrigues, C. M., & Leitão, J., (2013). Drivers' hand positions on the steering wheel while using Adaptive Cruise Control (ACC) and driving without the system. Human Factors and Ergonomics Society Europe Chapter 2013 Annual Conference.
- Piccinini, G. F. B., Rodrigues, C. M., Leitão, J., & Simões, A., (2014). Driver's behavioral adaptation to Adaptive Cruise Control (ACC): the case of speed and time headway. Journal of safety research.
- Greuter, S., Parker, J., Stewart, N., & Leach, G., (2003). Real-Time Procedural Generation of 'Pseudo Infinite' Cities, ACM GRAPHITE '03.
- Ietsugu, M. D. V., (2008). Distribuição intragástrica de refeições com 60 ml e 180 ml: três segmentações proximal-distal empregando a cintilografia, tese para obtenção do grau de mestre, pela Universidade Estadual Paulista.
- IMT - Instituto da Mobilidade e dos Transportes, (2011). Relatório de Monitorização da RRN – 2010, 2011, disponível em <http://www.imt-ip.pt>.
- IMT - Instituto da Mobilidade e dos Transportes (2014). Relatório de Monitorização da RRN – 2012-2013, disponível em <http://www.imt-ip.pt>.
- INE - Instituto Nacional de Estatística, (2011). Censos 2011 - Resultados definitivos, disponível em: <http://censos.ine.pt>.
- InIR - Instituto de Infraestruturas Rodoviárias IP, (2010) Documentos base - Revisão das Normas de Traçado, disponível em <http://www.imt-ip.pt>.
- InIR - Instituto de Infraestruturas Rodoviárias IP, (2015a). Documentos base – Marcas Rodoviárias, disponível em <http://www.imt-ip.pt>.
- InIR - Instituto de Infraestruturas Rodoviárias IP, (2015b). Documentos base – Sinalização Vertical Características, disponível em <http://www.imt-ip.pt>.

- Jacob, A., & Rodrigues, C., (2006). Análise de Manobras de Ultrapassagem em Ambiente Virtual, IV Congresso Rodoviário Português – Política Rodoviária: Os próximos 10 Anos.
- Jacob, A., & Rodrigues, C., (2008). Estudo das Manobras de Ultrapassagem em Ambiente Real e Virtual: Trajectória do Veículo Ultrapassante, V Congresso Rodoviário Português – Política Rodoviária: Sistemas Inteligentes, Logística e Turismo.
- Jia, Yan-Bin, (2014). Curvature, disponível em: www.cs.iastate.edu/~cs577/handouts/curvature.pdf
- Kelly, G., & McCabe, H., (2008). Citygen: An Interactive System for Procedural City Generation. GDTW, pp. 8-16, UK.
- Lagoa, J., & Ramos, A., (1998). Trigonometria, disponível em: <http://stor.no.sapo.pt/html/trigonometria/IndiceTrigonometria.html>.
- Latham, R., & Burns, D., (2006). Dynamic Terrain Modification Using a Correction Algorithm, IMAGE 2006 Conference Scottsdale, Arizona.
- Leitão, J. M., Coelho, A., & Ferreira, F. N., (1997). DriS–A Virtual Driving Simulator. Second International Seminar on Human Factors in Road Traffic, ISBN 972-8098-25-1.
- Leitão, J., (2000). Agentes Autónomos Controláveis em Simuladores de Condução, tese para obtenção do grau de Doutor, pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, disponível em: <http://hdl.handle.net/10216/12208>.
- Melo, P., Lobo, A., Couto, A., & Rodrigues, C., (2012). Road Cross-Section Width and Free-Flow Speed on Toe-Lane Rural Highways, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, vol. 2301, pp. 28-35.
- Milnor, J. W., (1950). On the total curvature of knots. *Annals of Mathematics*, pp. 248-257.
- Mitra, S., (2001). Digital Signal Processing, A Computed-Based Approach, Mc-GrawHill.
- Mueller, J. E., (1968). An introduction to the hydraulic and topographic sinuosity indexes 1. *Annals of the Association of American Geographers*, vol. 58, n.º 2, pp. 371-385.
- Muller, p., Wonka, p., Haegler, S., & Ulmer, A., Gool, L., (2006). Procedural Modeling of Buildings, *ACM SIGGRAPH*, vol. 25, n.º 3, pp. 614-623.
- Noriega, P., & Santos, J.A., (2010). Optical flow and road environments: Implications for ergonomic road design. In D. B. Kaber & G. Boy (Eds.), *Advances in Cognitive Ergonomics*, pp. 440-449, <http://www.crcnetbase.com/doi/abs/10.1201/EBK1439834916-c45>.
- OpenDRIVE, (2010). Format Specification rev 1.3, disponível em: <http://www.opendrive.org/docs/OpenDRIVEFormatSpecRev1.3D.pdf>.
- Ostadabbas, S., Farshbaf, M., Nourani, M., & Addepalli, S., (2011). Layered Semi-Markov road generation for driving simulations. In *Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, In Proceedings of the 14th International IEEE Conference, pp. 365-370.
- Pareja, I., Bayarri, S., & Rueda, S., (1999). Modelado de calidad para la visualización interactiva de carreteras, IX Congresso de Engenharia Informática.
- Parish, Y., & Muller, P., (2001). Procedural Modeling of Cities; *ACM Computer Graphics (Proceedings of SIGGRAPH'2001)*, pp. 301-308.
- EP - Estradas de Portugal, (2012). Mapa da rede nacional, documento disponível em: <http://www.estradasdeportugal.pt/index.php/pt/areas-de-atuacao/prn/143-mapas>, 2012.
- Pereira, M., Simões, A., Rodrigues, C., Leitão, J., Campos, C., & Bruyas, M., (2008a). Aging and Fitness to Drive: Impacts of in-vehicle information and communication systems. *Proceedings of the International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics*.

- Pereira, M., Simões, A., Rodrigues, C., Leitão, J., Campos, C., & Bruyas, M., (2008b). Sistemas de Informação e Comunicação Embarcados e Comportamento do Condutor: um estudo prático. V Congresso Rodoviário Português – Estrada 2008. Centro Rodoviário Português.
- Rodrigues C., Roque C., & Macedo J., (2008). Manual de Planeamento das Acessibilidades e da Gestão Viária, Sinalização Rodoviária.
- Roque C., (2005). Manual de Marcação Rodoviária, disponível em: <http://www.prp.pt>.
- RST - Regulamento de Sinalização do Trânsito, (2011). Disponível em: <http://www.ansr.pt>, 2011.
- Santos, J., Merat, N., Mouta, S., Brookhuis, K., & Waard, D., (2005). The interaction between driving and in-vehicle information systems: comparison of results from laboratory, simulator and real-world studies. *Transport Research Part F*, vol. 8, pp. 135-146.
- Smelik R. M., Tutenel T., Kraker K.J., & Bidarra R., (2008). A Proposal for a Procedural Terrain Modelling Framework, EGVE Symposium, pp. 39-42.
- Smelik, R., Tutenel, T., Kraker, J., & Bidarra, R., (2011). A declarative approach to procedural modeling of virtual worlds, *Computer & Graphics Journal*, Elsevier, vol. 35, n.º 2, pp. 352-363.
- Smelik, R. M., Tutenel, T., Bidarra, R., & Benes, B., (2014). A survey on procedural modelling for virtual worlds, In *Computer Graphics Forum*, vol. 33, n.º 6, pp. 31-50.
- Sun, J., Baciú, G., Yu, X., & Green, M., (2002). Template-Based Generation of Road Networks for Virtual City Modeling, VRST'02, pp. 33-40, NY USA.
- Teoh, S., (2007). Autopolis: Allowing User Influence in the Automatic Creation of Realistic Cities, *Advances in Visual Computing: Proc. of the 3rd International Symposium on Visual Computing (ISVC'07)*, pp. 118-129.
- Teoh, S., (2008) Algorithms for the Automatic Generation of Urban Streets and Buildings, *Proceedings of the International Conference on Computer Graphics and Virtual Reality (CGVR'08)*, pp. 122-128.
- Teoh, S. T., (2009). Riverland: an efficient procedural modeling system for creating realistic-looking terrains, In *Advances in Visual Computing*, pp. 468-479, Springer Berlin Heidelberg.
- Thomas, G., & Donikian, S., (2000). Modelling Virtual Cities Dedicated to Behavioural Animation. *EUROGRAPHICS 2000*, vol. 19, n.º 3, pp. 71-80.
- Vanegas, C. A., Aliaga, D. G., Wonka, P., Müller, P., Waddell, P., & Watson, B., (2010). Modelling the appearance and behaviour of urban spaces, In *Computer Graphics Forum*, vol. 29, n.º 1, pp. 25-42.
- Walton D., & Meek D., (2005). A controlled clothoid spline, *Computer & Graphics*, vol. 29, n.º 3, pp. 353-363.
- Weber, B., Müller, P., Wonka, P., & Gross, M., (2009). Interactive Geometric Simulation of 4D Cities, *Eurographics*, vol. 28, n.º 2, pp. 481-492.

