

Instituto Superior de Ciências do Trabalho e da Empresa

Departamento de Ciências e Tecnologias da Informação



**MODELAÇÃO DO SISTEMA RODOVIÁRIO:
NA PERSPECTIVA DO CONFLITO EMERGENTE**

António José Pereira Leal

**Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do
Grau de Mestre em Ciências da Complexidade**

Orientador:

Prof. Doutor ***Paulo Urbano***

FCUL/UL

Co-orientador:

Prof. Doutor ***João Luís Batista***

DSP/FCM/UNL

Lisboa, Setembro, 2008

*“A mente que se abre a uma nova ideia
jamais voltará ao seu tamanho original.”*
Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

Expresso a minha gratidão a todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a realização desta dissertação:

- Quero manifestar o meu agradecimento ao Prof. Dr. João Luís Batista, da Universidade Nova de Lisboa, meu co-orientador, pelo lançamento deste desafio e pelo seu incentivo durante esta caminhada;

- Ao Prof. Dr. Jorge Louça, do ISCTE, director do Curso de Mestrado em Ciências da Complexidade, pela luz que me lançou ao abrir-me a janela das ciências da complexidade sobre os fenómenos complexos;

- Ao Prof. Dr. Paulo Urbano, da Universidade de Lisboa, o meu orientador, parceiro de caminhada, por ler os meus escritos, pelas suas sugestões, por compreender as minhas dúvidas e por me ajudar a encontrar as melhores soluções... enfim, pela sua prestimosa colaboração;

- Aos meus colegas de curso pelos tempos que passámos juntos, pela partilha dos seus conhecimentos multidisciplinares e pela ajuda, que em várias ocasiões fizeram a diferença para ultrapassar as barreiras da racionalidade;

- Ao Senhor Tenente-General Meireles Carvalho, Comandante da Brigada de Trânsito, da Guarda Nacional Republicana, meu comandante, pela disponibilidade que sempre manifestou para abordar as problemáticas relacionadas com o fenómeno da sinistralidade e pela disponibilidade que me permitiu ter para vencer este desafio;

- Ao meu camarada e amigo Tomás, pelo incentivo que me proporcionou e pela ajuda que me ofereceu sempre que necessário;

- Aos meus colaboradores directos, o Varela e o Sousa, pela sua ajuda em momentos críticos em que foi necessário aliar este desafio com o desempenho profissional;

- À minha família um agradecimento muito especial, pela atenção, o apoio e a paciência que mais uma vez demonstrou, durante mais esta longa ausência, com abnegação e o sacrifício da sua comodidade pessoal.

A todos um muito obrigado.

RESUMO

Considerada a problemática da sinistralidade rodoviária, o insuficiente conhecimento das suas causas e as limitações e fragilidades das metodologias científicas tradicionalmente utilizadas para estudar e controlar o fenómeno, que se considera complexo, foi elaborada uma proposta de metodologia científica alternativa segundo os preceitos das ciências da complexidade.

A proposta apresentada consiste na representação sintética do sistema rodoviário através da modelação do sistema na perspectiva do conflito rodoviário. O processo de modelação partiu da observação macro das entidades de alto nível do sistema, ou seja, das propriedades emergentes de mobilidade individual, do trânsito colectivo e do conflito rodoviário, para de seguida identificar as entidades de baixo nível, a saber: os factores via, ambiente, veículo e humano. Estes factores foram caracterizados pelas suas variáveis de estado elementares, às quais foram atribuídos valores escalares parametrizados, de acordo com o conhecimento científico, técnico e empírico existentes.

Este trabalho consiste no primeiro passo dado na direcção da simulação computacional multi-agente do sistema rodoviário para fins de saúde pública, visando ultrapassar os constrangimentos e as fragilidades identificados nas metodologias tradicionais; conhecer melhor o funcionamento do sistema rodoviário; identificar outras propriedades emergentes; identificar os factores de risco que potenciam o conflito rodoviário, bem como as suas causas e, por fim, preconizar medidas preventivas que possam melhorar os padrões de segurança rodoviária.

Palavras-chave

Sistema rodoviário, conflito rodoviário, sistemas complexos, ciências da complexidade, modelação, simulação computacional e simulação multi-agente.

ABSTRACT

Considering not only the problem of road accidents, but also the insufficient awareness of its causes and the limitations and fragilities of scientific methodologies traditionally applied to the study and control of this complex phenomenon, a proposal of an alternative scientific methodology was elaborated, according to the complexity sciences precept.

The proposal in question consists of synthetic representations of the road system through the modelling of the system itself, within the road conflict perspective. The modelling system process was based on the macro-observation of the system high-level entities, that is, on the emergent properties of individual mobility, on the collective traffic and also on the road conflict, in order to identify the low-level entities, namely: road, environment, vehicle and individual. These four last factors were characterised by its elementary state varieties, to which parameterised scale values were attributed, according to technical and empirical scientific knowledge.

Therefore, this work intends to show the first step to be given in the implementation of a multi-agent computer simulation of the road system, for public health purposes, so that the limitations and fragilities of traditional methodologies can be surpassed: to know better the functioning of the road system; to identify emergent properties; to identify risk factors which contribute to the road conflict and its causes and, finally, to make known the preventive measures that may improve road safety standards.

Key words:

Road safety; road conflict; complex system; complexity sciences; modelling; computer simulation; multi-agent simulation.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	II
RESUMO	III
ABSTRACT	IV
ÍNDICE GERAL	V
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
ÍNDICE DE QUADROS	IX
Capítulo 1: INTRODUÇÃO	
1 Origem do trabalho	11
1.1 Problema de pesquisa	12
1.2 Objectivos do trabalho	14
1.2.1 Objectivo geral	14
1.2.2 Objectivos específicos	14
1.3 Justificação	15
1.3.1 Relevância	15
1.3.2 Ineditismo	15
1.3.3 Dificuldades	16
1.4 Metodologia	16
1.4.1 Método científico	16
1.4.2 Ciências da complexidade	17
1.4.3 Sistemas complexos	17
1.4.4 Simulação multi-agente	18
1.4.5 Roteiro de pesquisa	19
1.5 Estrutura do trabalho	19
Capítulo 2: CARACTERIZAÇÃO DO FENÓMENO DA SINISTRALIDADE RODOVIÁRIA	
2.1 Conceitos utilizados	21
2.2 No mundo	21
2.3 Na Europa	23
2.4 Em Portugal	24
2.4.1 Caracterização comparativa com a EU	25
2.4.2 Caracterização da sinistralidade grave no ano de 2007	26
2.5 Causas da sinistralidade rodoviária	33
2.6 Custos sócio-económicos da sinistralidade rodoviária	36
2.7 Conclusões	36
Capítulo 3: METODOLOGIAS TRADICIONAIS DE ESTUDO FENOMENOLÓGICO	
3 Metodologias tradicionais de estudo do fenómeno da sinistralidade rodoviária	39
3.1 Abordagem de saúde pública	39
3.2 Matriz de Haddon	41
3.3 Abordagem sistémica	41
3.4 Ferramentas sistémicas de estudo da sinistralidade rodoviária	44
3.5 Conclusões	45
Capítulo 4: CIÊNCIAS DA COMPLEXIDADE	
4.1 Conceitos de complexidade	49
4.2 Conceito de sistema	52
4.2.1 Tipos de sistemas	53
4.2.1.1 Sistemas complicados	53
4.2.1.2 Sistemas complexos	54
4.2.1.3 Sistemas complexos adaptativos	54
4.2.2 Características dos sistemas complexos	55
4.3 Ciências da complexidade	58
4.3.1 Teoria da complexidade	58
4.3.2 Metodologia utilizada pela teoria da complexidade	59
4.3.2.1 Nova abordagem científica	61
4.3.2.2 Modelos de emergência	62
4.3.2.3 Modelos de vida artificial	62
4.3.2.4 Estudo de sistemas complexos	63
4.3.2.5 Novas perspectivas em ciências sociais	63

4.3.2.6	Inteligência organizacional	66
4.3.2.7	Experimentação	66
4.3.2.8	Laboratórios computacionais	66
4.3.2.9	Tecnologias do conhecimento	67
4.3.2.10	Predição	67
4.3.2.11	Mundos virtuais	67
4.3.2.12	Construção de blocos de informação	68
4.3.2.13	Redes de aprendizagem activa	68
4.3.3	Simulação social baseada em agentes	69
4.3.3.1	Simulação multi-agente	70
4.3.4	Modelação	71
4.4	Instituto de Santa Fé	73
4.5	Conclusões	73
Capítulo 5: ANÁLISE DO SISTEMA E DO CONFLITO RODOVIÁRIO		
5	Sistema rodoviário	75
5.1	Caracterização do sistema rodoviário	76
5.1.1	Factor via	76
5.1.2	Factor veículo	76
5.1.3	Factor ambiente	77
5.1.4	Factor humano	77
5.2	Interacção dos elementos no sistema rodoviário	77
5.2.1	Processo de condução	78
5.2.1.1	Modelo do processo de condução: hierarquia de decisões	78
5.3	Conflito rodoviário	81
5.3.1	Acidente de viação	81
5.3.2	Causas do conflito rodoviário	82
5.3.3	Consequências do conflito rodoviário	85
5.4	Sistema rodoviário como um sistema complexo	86
5.4.1	Adaptação, evolução e auto-organização do sistema rodoviário	88
5.4.2	Propriedades de emergência	88
5.5	Conclusões	90
Capítulo 6: MODELAÇÃO DO SISTEMA RODOVIÁRIO		
6	Modelação	93
6.1	Modelo teórico seguido	94
6.2	Modelação do sistema rodoviário	94
6.2.1	Factor via	96
6.2.1.1	Classe de vias	96
6.2.1.2	Geometria da via	97
6.2.1.3	Intersecções da via	98
6.2.1.4	Faixa de rodagem	98
6.2.1.5	Pavimentos	99
6.2.1.6	Aderência	99
6.2.1.7	Resumo	102
6.2.2	Ambiente	102
6.2.2.1	Condições meteorológicas	102
6.2.2.2	Luminosidade	103
6.2.2.3	Visibilidade	103
6.2.2.4	Tráfego rodoviário	106
6.2.2.5	Normas de circulação	106
6.2.2.6	Resumo	108
6.2.3	Veículo	108
6.2.3.1	Segurança activa	108
6.2.3.2	Segurança passiva	109
6.2.3.3	Tipos de veículos	109
6.2.3.4	Distribuição do tipo de veículos em Portugal	110
6.2.3.5	Mobilidade	111
6.2.3.6	Resumo	114

6.2.4	Factor humano	115
6.2.4.1	Modelo do processo de condução	115
6.2.4.2	Competências técnicas	116
6.2.4.3	Tempo de reacção	117
6.2.4.4	Capacidade de visão	118
6.2.4.5	Comportamento	122
6.2.4.6	Estudo de campo sobre o comportamento dos condutores	125
6.2.4.7	Peões	127
6.2.4.8	Resumo	128
6.3	Validação da modelação	128
6.4	Conclusões	130
Capítulo 7: SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL E SIMULAÇÃO RODOVIÁRIA		
7.1	Simulação computacional	131
7.2	Metodologias de simulação	131
7.2.1	Método de simulação “Monte Carlo”	132
7.2.2	Método de simulação “Comparação Regular”	132
7.2.3	Método de simulação por “Eventos Discretos”	132
7.3	Processo de simulação	134
7.4	Modelos de micro-simulação	134
7.4.1	Simulação baseada em agentes	135
7.5	Linguagens de programação para simulação	136
7.5.1	Bibliotecas de simulação	136
7.6	Simulação social	137
7.6.1	Simulação rodoviária	137
7.6.2	Principais algoritmos de micro-simulações rodoviárias	139
7.6.3	Aplicações comerciais	140
7.6.4	Simulação rodoviária baseada em agentes	141
7.7	Conclusões	149
Capítulo 8: CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES		
Bibliografia		157
Apêndice 1: Simulação multi-agente do modelo de emergência “O Trevo”		161
Apêndice 2: Terminologia utilizada para descrever o sistema e a sinistralidade rodoviária		173
Apêndice 3: Estudo do movimento dos veículos		185
Apêndice 4: Estudo da distribuição das velocidades praticadas nas estradas portuguesas		197

LISTA DE FIGURAS

2.1	Distribuição global das causas de mortalidade no mundo	22
2.2	Distribuição de vítimas mortais (EU-25), período de 1995 a 2004	23
2.3	Evolução do número de vítimas mortais por milhão de habitantes em Portugal e EU	24
2.4	Medidas de segurança rodoviária e indicadores de sinistralidade (1988-2007)	26
2.5	Distribuição da sinistralidade por meses do ano	27
2.6	Distribuição da sinistralidade por dias da semana	27
2.7	Distribuição da sinistralidade pelas horas do dia	28
2.8	Distribuição de acordo com a localização espacial	28
2.9	Distribuição de acordo com o tipo de via	29
2.10	Distribuição pelo tipo de veículos intervenientes	29
2.11	Distribuição pela idade do veículo	29
2.12	Distribuição da sinistralidade por escalões etários e sexo dos condutores	30
2.13	Distribuição de acções e manobras que antecedem os acidentes	30
2.14	Distribuição de acordo com as condições atmosféricas	31
2.15	Distribuição da sinistralidade pela tipologia de acidentes	31
2.16	Distribuição etária das vítimas pelo tipo de veículo	32
2.17	Peões vítimas pela localização do atropelamento	32
2.18	Tipo de acções executadas pelos peões mortos	32
2.19	Distribuição dos peões mortos pelo tipo de via	33
2.20	Factores responsáveis pela sinistralidade rodoviária	33
3.1	Modelo de abordagem de saúde pública	40
3.2	Matriz de Haddon	41
3.3	Modelo de abordagem sistémico	43
4.1	Modelo de síntese para a previsão em complexidade	60
5.1	Composição do sistema rodoviário	75
5.2	Estrutura hierárquica das tarefas de condução	79
5.3	Relação entre a dispersão de velocidades e a sinistralidade rodoviária	86
6.1	Representação da relação entre o modelo e o alvo	94
6.2	Representação da metodologia de modelação	95
6.3	Modelo do sistema na perspectiva do conflito rodoviário	95
6.4	Representação genérica das classes de vias	97
6.5	Representação do tipo de intersecção de vias	98
6.6	Largura máxima da faixa de rodagem	98
6.7	Determinação do declive do pavimento	101
6.8	Triângulo de visibilidade em cruzamentos	105
6.9	Limites de velocidade legais	107
6.10	Modelo de processamento da informação na condução	115
6.11	O olho humano	119
6.12	Representação da qualidade visual em diferentes condições de luz	120
6.13	A influência da velocidade no campo de visão	121
6.14	Teoria da acção racional de Fishbein e Ajzen	124
6.15	Teoria do comportamento planeado de Ajzen	124
6.16	Requisitos de uma boa prática de modelação	129
7.1	Diagrama do modelo de simulação comparação regular	132
7.2	Esquema de um simulador de eventos discretos	133
7.3	Geração do modelo, simulação, validação e verificação.	134
7.4	Abordagens de modelação a nível individual	135
7.5	Interacções de um agente genérico com o ambiente	135
7.6	Relacionamento entre módulos	142
7.7	Diagrama do agente	145
7.8	Diagrama do veículo real e elemento humano integrados na simulação	147

LISTA DE QUADROS

2.1	Identificação das principais causas de mortalidade no mundo	22
2.2	Rácio de mortos por 100.000 habitantes resultantes de acidentes de viação	23
2.3	Comparação da evolução do número de vítimas mortais em Portugal	24
2.4	Tabela comparativa sobre o cumprimento dos objectivos do PNPR	25
2.5	Causas humanas da sinistralidade rodoviária	34
2.6	Responsabilidade dos diferentes factores da sinistralidade	34
2.7	Causas primárias isoladas e associadas da sinistralidade	35
2.8	Resumo do quadro anterior	35
3.1	Comparação de ferramentas de estudo sistémico da sinistralidade rodoviária	45
3.2	Base de dados sistémica do conflito rodoviário	46
5.1	Causa humanas de acidentes de viação	83
5.2	Matriz de comparação do sistema rodoviário com as propriedades dos tipos de sistemas	87
6.2	Coeficientes de atrito de referência face aos tipos de pavimento	100
6.3	Resumo das variáveis de estado, atributos e valores escalares do factor via	102
6.4	Valores de DVP e de DVU recomendados para as estradas da rede rodoviária nacional	104
6.5	Valores recomendados nas normas americanas e para as estradas da rede nacional	104
6.6	Distâncias de visibilidade em cruzamento previstas nas normas da JAE	105
6.7	Resumo das variáveis de estado, atributos e valores escalares do factor ambiente	108
6.8	Distribuição do tipo de veículos em Portugal	111
6.9	Distribuição de velocidades em auto-estrada	114
6.10	Resumo das variáveis de estado, atributos e valores escalares do factor veículo	114
6.11	Tempos de reacção medidos dos condutores	117
6.12	Composição dos tempos de reacção em situação de travagem de emergência	118
6.13	Perfis dos condutores no cumprimento dos limites de velocidade	125
6.14	Perfis dos condutores no cumprimento dos sinais luminosos	126
6.15	Resultados da avaliação do cumprimento dos sinais luminosos	127
6.16	Largura dos caminhos para peões e ciclistas	128
6.17	Resumo das variáveis de estado, atributos e valores escalares do factor humano	128
7.1	Tabela resumo sobre trabalhos de simulação rodoviária baseado em agentes	148

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

1 Origem do trabalho

O sistema rodoviário representa um tipo de sistema social moderno. Teve origem na sequência da descoberta do motor de explosão e da produção industrial em cadeia, na primeira metade do séc. XX, nas sociedades economicamente mais desenvolvidas da época, e gradualmente expandiu-se a todo o planeta.

A mais-valia do veículo automóvel consiste na rentabilização do espaço e do tempo. A exploração massiça deste conceito de comunicação implicou uma série de transformações políticas, económicas e sociais.

Politicamente, implicou a organização do sistema rodoviário, o desenvolvimento de infra-estruturas, a regulação, gestão e controlo dos tráfegos, a obtenção de fontes de energia, etc... Do ponto de vista económico, as sociedades devem em boa parte o seu desenvolvimento ao transporte massiço de pessoas e de mercadorias por estrada. É sabido que uma região sem vias de comunicação dificilmente se desenvolverá. A paralisação do transporte de mercadorias poderá gerar o colapso vital de um país. O consumo depende basicamente do transporte rodoviário.

Socialmente, o veículo automóvel é hoje um artigo de primeira necessidade e um elemento indispensável de trabalho para um grande número de pessoas. O trânsito é cultural, é elemento de relações humanas. O veículo automóvel é um instrumento de liberdade, permite aos cidadãos deslocarem-se para qualquer parte em qualquer momento, satisfazendo necessidades e expectativas particulares. É difícil imaginar a actividade recreativa sem o automóvel: os fins-de-semana, as “pontes”, as férias, etc., que implicam grandes movimentos populacionais.

Todavia, a par das vantagens enunciadas, o veículo automóvel trouxe também grandes inconvenientes, designadamente: os congestionamentos rodoviários, a poluição ambiental, a falta de espaço nas cidades, as fontes de energia, e ainda o problema mais grave que consiste no fenómeno da sinistralidade rodoviária, que tantas vidas tem ceifado desde 17 de Agosto de 1896, a data da primeira vítima mortal conhecida no mundo. Tratou-se de uma senhora de 44 anos, Bridget Driscoll, mãe de dois filhos, que foi atropelada por um veículo automóvel. O condutor, Arthur Edsell, com uma experiência de condução de três semanas, referiu em

julgamento que vinha a conversar com a jovem passageira que seguia no banco de trás. Terminado o julgamento, o veredicto do júri foi tratar-se de uma “*morte accidental*”. Porém, os jurados deixaram a seguinte recomendação: “*This must never happen again*” (Road Peace, 2004). Não tardou que, em 25 de Fevereiro de 1899, em Grove Hill, Grã-Bretanha, se repetisse o evento, desta feita com a morte do próprio condutor do veículo. Desde então, a recomendação daquele júri jamais se cumpriu.

Para mitigar este problema, tem sido feito um grande esforço de investigação e de desenvolvimento quer das infra-estruturas rodoviárias, quer da regulação das relações em ambiente rodoviário, quer das performances dos veículos automóveis. Porém, o problema, embora se encontre de alguma forma controlado nas sociedades desenvolvidas, continua a constituir um grave flagelo para a humanidade, sobretudo nas sociedades em vias de desenvolvimento.

Tratando-se de um fenómeno moderno, classificado como um problema de saúde pública pela Organização Mundial de Saúde (OMS), existem questões para as quais ainda não foi possível obter resposta, apesar de todo o esforço de controlo por parte das entidades competentes.

1.1 Problema de pesquisa

Algumas das questões a formular poderão ser as que se colocam seguidamente.

A primeira: *Por que choram as pessoas intervenientes em acidentes?*

Uma tentativa de resposta, à primeira vista, poderá ser pela dor dos ferimentos próprios ou das pessoas com quem partilhavam a viagem. Ou pela dor de pessoas desconhecidas, que ali partilharam o caminho e conheceram pela primeira vez. Refere-se que “partilharam” porque a viagem e o caminho e a vida, por vezes, terminam exactamente ali, naquele instante. Talvez pela perda de um bem, talvez pela perda de um rumo! Certo é que quase sempre choram.

Se este é um comportamento quase sempre comum, significará certamente que aquelas pessoas não querem e não aceitam aquele resultado. Assim, suscita-se uma nova questão:

Por que contribuíram então aquelas pessoas para a ocorrência daquele evento?

Ao considerarmos o contributo das pessoas nos acidentes de viação, apoiamo-nos no conceito do sistema rodoviário, que é composto por quatro factores: a via, o veículo, o ambiente e o ser humano. Pelo conhecimento hoje existente, o factor humano é o principal responsável por mais de 90% das causas dos sinistros rodoviários. Assim, surge aqui um paradoxo que parece difícil de explicar.

Todavia, se olharmos atentamente para o fenómeno rodoviário poderemos encontrar outros paradoxos igualmente difíceis de explicar. Observemos a velocidade vertiginosa que a sociedade moderna, da “excelência”, hoje nos impõe, exigindo-nos “*muito, bem e depressa*” e, por outro lado, pretendendo um ambiente rodoviário “*sereno, calmo, tranquilo, seguro*”! Outro exemplo paradoxal prende-se com as novas tecnologias implementadas nos veículos automóveis. Nestes, se por um lado são implementados sistemas cada vez mais sofisticados de controlo da segurança dinâmica, por outro lado, incluem-se simultaneamente vários instrumentos e equipamentos de diagnóstico, de orientação geográfica, de comunicação, etc..., que podem reduzir os atributos mais importantes para uma condução segura, ou seja, a atenção do condutor.

O acto da condução é um processo complexo, de múltiplas interacções não lineares, que podem levar a resultados imprevisíveis e incertos, sobretudo devido à quantidade de pessoas em interacção, de recepção de múltiplos estímulos, que exigem decisões continuadas, tornando assim o ambiente rodoviário também complexo.

Chegou pois o momento de apresentar a proposta desta dissertação, a qual visa dar o primeiro passo na tentativa de explicação científica do paradoxo aparentemente existente entre a ocorrência do acidente de viação, o contributo do factor humano e o comportamento manifesto de recusa dos seus resultados.

Para este projecto, vou utilizar uma metodologia científica inédita, relacionada com as Ciências da Complexidade. Trata-se de ciências multidisciplinares, que têm como campo de investigação os sistemas complexos, como parece ser o caso do sistema rodoviário. Ou seja, sistemas constituídos por uma miríade de partes, de cuja interacção entrelaçada emergem fenómenos inexplicáveis pela análise isolada das suas partes. Para a análise holística deste tipo de sistemas, as ciências da complexidade usam como instrumentos de experimentação ferramentas computacionais, que permitem simular a realidade através da modelação dos sistemas em estudo. A mais-valia das ferramentas computacionais prende-se com a capacidade de processar grandes quantidades de informação num tempo reduzido.

Esta nova metodologia pretende estimular novas formas de encarar os fenómenos, acendendo novas luzes sobre os problemas, observados numa perspectiva holística, com o fim de despertar intuições sobre os mesmos. Tal parece ser uma novidade no âmbito da investigação do problema da sinistralidade rodoviária numa perspectiva da saúde pública.

No decurso desta investigação sobre o problema do conflito rodoviário, tentarei dar resposta a três perguntas que penso serem fundamentais:

- De que modo as ciências da Complexidade podem ajudar a compreender o fenómeno do conflito rodoviário (sinistralidade rodoviária);
- Que tipo de modelação poderá representar sinteticamente o sistema rodoviário como um todo, considerando as suas diferentes partes e interacções;
- Que instrumentos tecnológicos de simulação melhor poderão prever ou intuir sobre a causalidade do conflito rodoviário.

1.2 Objectivos do trabalho

1.2.1 Objectivo geral

Este trabalho visa dar o primeiro passo em direcção à simulação computacional do sistema rodoviário para a pesquisa de propriedades de emergência que possam justificar a ocorrência do conflito rodoviário. Assim, este passo consiste em, sob os preceitos das ciências da Complexidade, analisar o sistema rodoviário como um sistema complexo e realizar uma proposta de modelação do sistema para efeitos de simulação multi-agente.

1.2.2 Objectivos específicos

- Caracterizar a problemática do fenómeno da sinistralidade rodoviária;
- Apresentar as metodologias tradicionais de estudo do fenómeno;
- Abordar as ciências da complexidade como metodologia de investigação científica;
- Analisar o sistema rodoviário como um sistema complexo;
- Realizar uma proposta de modelação do sistema rodoviário;
- Calibrar o modelo com os dados científicos, técnicos e empíricos conhecidos;
- Referir o estado da arte sobre simulações computacionais rodoviárias;
- Efectuar uma demonstração experimental de uma simulação multi-agente;
- Enunciar as conclusões e as recomendações para trabalhos futuros.

1.3 Justificação

1.3.1 Relevância

A relevância teórica do presente trabalho prende-se com a ênfase na complexidade, nos sistemas complexos, na caracterização da problemática do conflito rodoviário e nas metodologias tradicionais de estudo do fenómeno.

A relevância prática prende-se com a modelação do sistema rodoviário, a sua calibração com dados científicos e a realização de uma demonstração experimental de uma simulação multi-agente desenvolvida a partir da modelação e a reunião num único documento de informação organizada e estruturada sobre o fenómeno da sinistralidade que, na maior parte, pela sua novidade, não constitui conhecimento correntemente.

A relevância prática resulta também do interesse e expectativas demonstrados por algumas entidades responsáveis pelo controlo da segurança rodoviária, auscultadas em entrevistas exploratórias, com respeito aos resultados que possam vir a ser obtidos pela presente proposta de investigação do fenómeno da sinistralidade rodoviária.

Por outro lado, trata-se de uma investigação que alia o conhecimento teórico e a experiência prática do autor, em resultado da sua qualidade de estudante do curso de Mestrado em Ciências da Complexidade e das suas funções profissionais passadas e presentes. No passado recente, como comandante de uma força pública responsável pela segurança rodoviária ao nível distrital, durante 11 anos, e no presente, como responsável pela estrutura de investigação criminal da sinistralidade rodoviária, ao nível continental, durante 5 anos.

1.3.2 Ineditismo

As Ciências da Complexidade abrangem uma área ampla e aberta a inovações no campo da dos fenómenos complexos e da construção de estruturas de referência. Destacam-se, por exemplo, Simon (1968), Morin (1977), Gell-Mann (1996), Stacey (1996) e Axelrod e Cohen (1999).

São poucas as pesquisas no que diz respeito a modelagens desenvolvidas para intervir nos sistemas complexos. Além disso, as abordagens existentes são aplicadas a áreas de conhecimento muito distintas. Na Biologia, sobressai Kauffman (1993); nas Ciências da Computação, Holland (1995); nas Ciências dos Sistemas, Le Moigne (1977); na Física e nas Ciências Cognitivas, Heylighen (1988).

Este trabalho segue os preceitos das ciências da complexidade e da modelação de sistemas complexos, o que, tendo em atenção as pesquisas efectuadas, parece ser uma novidade no âmbito da investigação do problema da sinistralidade rodoviária numa perspectiva da saúde pública. Por outro lado, em Portugal a novidade parece ser mais evidente, não só pela metodologia utilizada, mas também pelo carácter precursor do Curso de Mestrado em Ciências da Complexidade, que se encontra na sua primeira edição.

1.3.3 Dificuldades

Investigar os fenómenos complexos de modo holístico afigura-se bastante mais difícil do que estudar as suas partes isoladas. Todavia, quando se analisam apenas partes dos sistemas e se generalizam os resultados encontrados para o sistema como um todo, desconsideram-se as interacções, as conexões, as propriedades emergentes, as diferenças entre as partes que constituem todo o sistema. Neste caso, isola-se o sistema das interferências externas, o que facilita a análise, já que no sistema fechado é possível prever e dominar o seu funcionamento, facto que reduz a dificuldade de intervenção sistémica. O método do reducionismo não detecta a complexidade, antes oculta as ligações, as articulações, as implicações, as imbricações, as interdependências (Morin, 1977). Contrariamente, quando se modela um sistema de modo a evidenciar, descrever e intervir na sua complexidade, o grau de dificuldade aumenta consideravelmente.

Por outro lado, considerada a formação académica de base do autor, na área das ciências sociais, com poucos conhecimentos sobre linguagens de programação, houve bastante dificuldade em programar a simulação multi-agente experimental. O seu carácter demonstrativo advém exactamente deste constrangimento.

Todavia, desde já se adivinha uma outra dificuldade: a de fazer passar a mensagem de uma nova metodologia científica que procura quebrar as barreiras das metodologias tradicionais de pendor reducionista, como referiu Portela (2007) num dos seus seminários no âmbito do mestrado.

1.4 Metodologia

1.4.1 Método científico

Segundo Leite (2004), o termo “metodologia” refere-se ao caminho pelo qual se questionam os problemas e procuram as respostas (Taylor e Bogdan, 1998). Vasconcelos (2002) define-o como uma estratégia para abordagem de um tema em foco, incluindo a estratégia institucional, o desenho da pesquisa, as fontes de dados, as informações e os instrumentos de

investigação. A metodologia é o caminho e o instrumental próprio de abordagem da realidade. “A compreensão da realidade é sempre mediada por teorias, por crenças, por representações. Não é possível fazer ciência sem método” (Minayo, 1993).

Para o desenvolvimento da presente proposta adoptar-se-á uma nova forma de fazer ciência, ou seja, uma ciência multidisciplinar que procura analisar fenómenos complexos, cuja explicação não seja possível através das metodologias da ciência clássica. Ou seja, analisar-se-á o problema através das Ciências da Complexidade e da Teoria dos Sistemas, encarando-o de modo holístico em vez de simplesmente efectuar a análise reduzida das suas partes.

Assim, descrevem-se sucintamente os conceitos multidisciplinares utilizados para o desenvolvimento desta proposta.

1.4.2 Ciências da complexidade

Heylighen (1988) aponta o estudo científico da complexidade como a alternativa para intervir em sistemas complexos, que apresentam as seguintes características: muitas partes diferentes, muitas interacções, comportamento imprevisível e dificuldade de controlo.

As ciências da complexidade são mais conhecidas pela Teoria do Caos e do “Efeito Borboleta”, ou seja, pela noção de que uma borboleta bate as asas no Brasil e provoca um tufão na América do Norte.

A abordagem da complexidade pode ajudar a impulsionar uma nova forma de pensar, acendendo novas luzes sobre o fenómeno, observadas as propriedades desta nova perspectiva científica (Schilperoord, 2004):

- Fomenta uma observação holística, em vez de reducionista;
- Tem por objectivo prever e intuir sobre os fenómenos;
- Foca a atenção, simultaneamente no presente e no futuro;
- Produz resultados qualitativos para a identificação de padrões;
- Estuda a evolução e a emergência de redes de interacções;
- É uma ciência multidisciplinar;
- Utiliza metodologias cuja objectividade permite previsões de grande profundidade.

1.4.3 Sistemas complexos

“Os sistemas complexos são sistemas constituídos por uma miríade de pequenas partes cuja interacção oculta o todo. São sistemas (físicos, biológicos, sociais e artificiais) que consistem em múltiplas interacções de múltiplas entidades que podem exhibir propriedades e

comportamentos emergentes, ou seja, propriedades imprevistas resultantes das interações. O estudo multidisciplinar destes sistemas pode produzir profundo conhecimento num vasto campo de fenómenos e de processos que expressem evolução, auto-organização e constante mudança” (Schilperoord, 2004).

1.4.3.1 Sistemas complexos adaptativos

Segundo Schilperoord (2004), um interessante modelo organizacional para caracterizar a complexidade do sistema rodoviário é o denominado como "Sistemas Complexos Adaptativos" (SCA). Em resumo, os SCA podem considerar-se sistemas complexos que exibem uma grande capacidade de adaptação (para sobreviver, funcionar, evoluir,...), em contextos de grande incerteza e aleatoriedade.

"Perspectivas decorrentes do estudo de sistemas adaptativos complexos têm sido usadas para repensar e redesenhar empresas, indústria e organizações governamentais e sistemas para que sejam mais flexíveis, adaptáveis e capazes de responder rapidamente e de forma mais eficaz às mudanças no ambiente. Os Sistemas Adaptativos Complexos são caracterizados por organizações distribuídas ou por redes, cujas partes exercem influência recíproca, quer directa, quer indirectamente, através de ciclos de retorno (feedback loops), as quais evoluem e se adaptam continuamente para realizar grandes objectivos" (Sanders, 2003; Sanders e Kadtke, 2001).

1.4.4 Simulação multi-agente

A Simulação Multi-Agente (SMA) pode considerar-se um modelo adequado para a investigação e previsão de problemas complexos. A SMA é uma tecnologia de modelação em computador que permite simular populações de agentes para observação das suas interações e decisões. Esta metodologia é considerada uma “nova forma de fazer ciência”.

“Uma das novas formas em que os cientistas são capazes de conduzir a investigação sobre sistemas complexos é usando a tecnologia informática para desenvolver "modelos de agentes", os quais simulam a probabilidade do comportamento do sistema a ser estudado. Esta nova tecnologia é designada como a "terceira via" de fazer ciência, a par das outras duas, que são a experimentação e a observação/descrição. "A SMA, muitas vezes, identifica processos e mudanças que não são intuitivamente óbvias mas que têm a capacidade de transformar o sistema” (Sanders, 2003).

Assim, procederei à modelação do sistema rodoviário, à identificação dos seus elementos base e à análise de algumas interacções dos mesmos através de uma simulação computacional multi-agente experimental.

Com base nas metodologias apresentadas é possível desenvolver uma perspectiva de estudo sobre a complexidade do fenómeno rodoviário com o objectivo de observar características ainda não identificadas e que podem influenciar todo o sistema, gerando o conflito rodoviário.

1.4.5 Roteiro da pesquisa

Seguindo os conceitos do método científico, descreve-se a metodologia utilizada, passo a passo.

- **1º Passo:** Proceder à caracterização da problemática da sinistralidade e identificar as causas conhecidas;
- **2º Passo:** Apresentar as metodologias tradicionais para estudo e controlo do fenómeno;
- **3º Passo:** Proceder à pesquisa bibliográfica sobre ciências da complexidade, teoria dos sistemas e simulações computacionais;
- **4º Passo:** Verificar se o sistema rodoviário corresponde aos preceitos que caracterizam os sistemas complexos;
- **5º Passo:** Efectuar um estudo de campo para obter dados empíricos com vista à calibração do modelo;
- **6º Passo:** Desenvolver uma simulação multi-agente utilizando a modelação do sistema;
- **7º Passo:** Apresentar as conclusões e as recomendações de trabalhos futuros.

1.5 Estrutura do trabalho

Este trabalho está estruturado em oito capítulos.

O Capítulo 1 identifica-se com a introdução ao trabalho, discutindo a sua origem, o problema de pesquisa, os objectivos geral e específicos, a justificativa, a relevância, o ineditismo e a dificuldade do tema. Trata-se ainda de apresentar a metodologia utilizada e a estrutura do trabalho.

O Capítulo 2 dedica-se a uma caracterização da problemática da sinistralidade rodoviária no Mundo, na Europa e em Portugal, e das suas causas conhecidas.

O Capítulo 3 reporta-se à descrição das metodologias tradicionais actualmente utilizadas no estudo do fenómeno.

O Capítulo 4 trata do estado da arte das ciências da complexidade e das suas metodologias e instrumentos.

O Capítulo 5 discute e analisa o sistema rodoviário como sistema complexo.

O Capítulo 6 dedica-se à modelação do sistema rodoviário, na perspectiva do conflito rodoviário.

O Capítulo 7 refere-se aos progressos na simulação computacional de ambientes rodoviários.

O Capítulo 8 engloba as conclusões do trabalho e recomendações para trabalhos futuros.

As referências bibliográficas são apresentadas em capítulo próprio, seguidas de quatro Apêndices e dos Anexos.

O Apêndice 1 trata da demonstração de uma simulação multi-agente do sistema rodoviário.

O Apêndice 2 apresenta a terminologia utilizada para descrever o sistema rodoviário.

O Apêndice 3 contém um estudo do movimento físico dos objectos.

O Apêndice 4 dedica-se à apresentação de um estudo sobre as velocidades praticadas pelos condutores nas estradas portuguesas.

Em Anexo é colocado um CD com uma demonstração experimental do modelo do sistema rodoviário, designado por “O Trevo”.

"This must never happen again." (Sentença do Tribunal de Júri, 1896)

Capítulo 2

CARACTERIZAÇÃO DO FENÓMENO DA SINISTRALIDADE

Neste capítulo vai proceder-se à caracterização da sinistralidade rodoviária com base nos dados recolhidos sobre a constatação do fenómeno no Mundo, na Europa e em Portugal e, também, sobre a causalidade já identificada e os custos económicos estimados.

Antes de mais, falando-se de acidentes e de acidentes de viação, considera-se necessário conceptualizar uma série de conceitos, cujas definições são da autoria da antiga Direcção Geral de Viação e assumidas pela actual Autoridade Nacional de Segurança Rodoviária.

2.1. Conceitos utilizados

Considerada a extensão de conceitos utilizados na descrição do fenómeno da sinistralidade rodoviária, estes foram colocados no Apêndice 1 do presente trabalho. Este Apêndice destina-se a compilar a terminologia utilizada normalmente, pelas entidades oficiais, para descrever: o fenómeno da sinistralidade; as manobras dos condutores e da condução; as infra-estruturas rodoviárias; a sinalização; o tráfego rodoviário; o trânsito; e os veículos.

2.2. No mundo

O fenómeno da sinistralidade rodoviária considera-se um fenómeno moderno, emergido com o advento do sistema e da circulação rodoviária em inícios do Séc. XX.

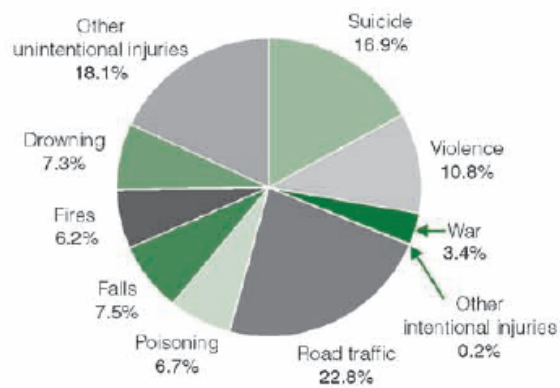
Segundo a Organização Mundial de Saúde (OMS, 2004), o primeiro peão do mundo a falecer por atropelamento foi registado em 1896 e o primeiro condutor a morrer foi registado em 1898. A OMS estima que a sinistralidade rodoviária mata cerca de 1,2 milhões de pessoas e fere cerca de 50 milhões por ano. Todos os dias morrem, em média, mais de 3000 pessoas em resultado de acidentes.

Segundo alguns estudos da OMS (2004), por volta de 1990 os acidentes rodoviários foram considerados a nona maior causa de mortalidade no mundo e, os mesmos estudos, prevêem que em 2020 venha a ascender à terceira posição, imediatamente atrás da “Cardiopatia Esquémica” e da “Depressão Unipolar Grave” e à frente das infecções respiratórias, da tuberculose, das guerras e da SIDA (Murray, 1996).

Quadro 2.1 – Identificação das principais causas de mortalidade no mundo (OMS, 2004).

1990		2020	
Rango	Enfermedades o traumatismos	Rango	Enfermedades o traumatismos
1	Infecciones de las vías respiratorias inferiores	1	Cardiopatía isquémica
2	Enfermedades diarreicas	2	Depresión unipolar grave
3	Trastornos perinatales	3	Traumatismos causados por el tránsito
4	Depresión unipolar grave	4	Trastornos cerebrovasculares
5	Cardiopatía isquémica	5	Enfermedad pulmonar obstructiva crónica
6	Trastornos cerebrovasculares	6	Infecciones de las vías respiratorias inferiores
7	Tuberculosis	7	Tuberculosis
8	Sarampión	8	Guerras
9	Traumatismos causados por el tránsito	9	Enfermedades diarreicas
10	Anomalías congénitas	10	VIH

No universo das catástrofes de maior mortalidade, as vítimas de acidentes de viação representam a maior percentagem (23%) das causas de morte no mundo (Peden, 2004).



Fonte: OMS, 2004.

Figura nº 2.1 - Distribuição global das causas de mortalidade no Mundo.

Geograficamente, a OMS estima que 90% das mortes resultantes de acidentes de viação ocorrem em países de baixos e de médios recursos, onde habitam cerca de 81% da população e se encontra 20% do parque automóvel mundial. O continente Africano apresenta o rácio mais elevado de vítimas mortais por 100 000 habitantes com 28,3 vítimas, seguindo-se o Médio Oriente com 26,4 e 19, consoante a capacidade económica dos países. E as regiões com menor mortalidade correspondem aos continentes Europeu, com 17,4 e 11, e Americano, com 16,2 e 14,8 (Peden, 2004).

Quadro 2.2 – Rácio de mortos por 100 000 habitantes resultantes de acidentes de viação.

WHO region	Low-income and middle-income countries	High-income countries	Fonte: OMS,
African Region	28.3	—	
Region of the Americas	16.2	14.8	
South-East Asia Region	18.6	—	
European Region	17.4	11.0	
Eastern Mediterranean Region	26.4	19.0	
Western Pacific Region	18.5	12.0	

Mais de metade das vítimas mortais são jovens adultos situados nos escalões etários entre os 15 e os 44 anos de idade, dos quais 73% são do sexo masculino e afecta maioritariamente peões, ciclistas e motociclistas (OMS, 2004).

2.3. Na Europa

Na Europa, no Séc. XX, a sinistralidade alienou mais de um milhão de vidas. Dados referentes a 2004 apontam, na União Europeia (EU-25), para cerca de 1.400 mil acidentes com vítimas, das quais 42 mil são vítimas mortais (CARE, 2006). A média de vítimas por milhão de habitantes em 1995 foi de 132 mortos e em 2004 foi de 95 mortos, o que representa uma diminuição de 28% de vítimas por milhão de habitantes. Portugal, neste intervalo de tempo, foi o país que, comparativamente, registou a maior diminuição, no valor de 54,4%.

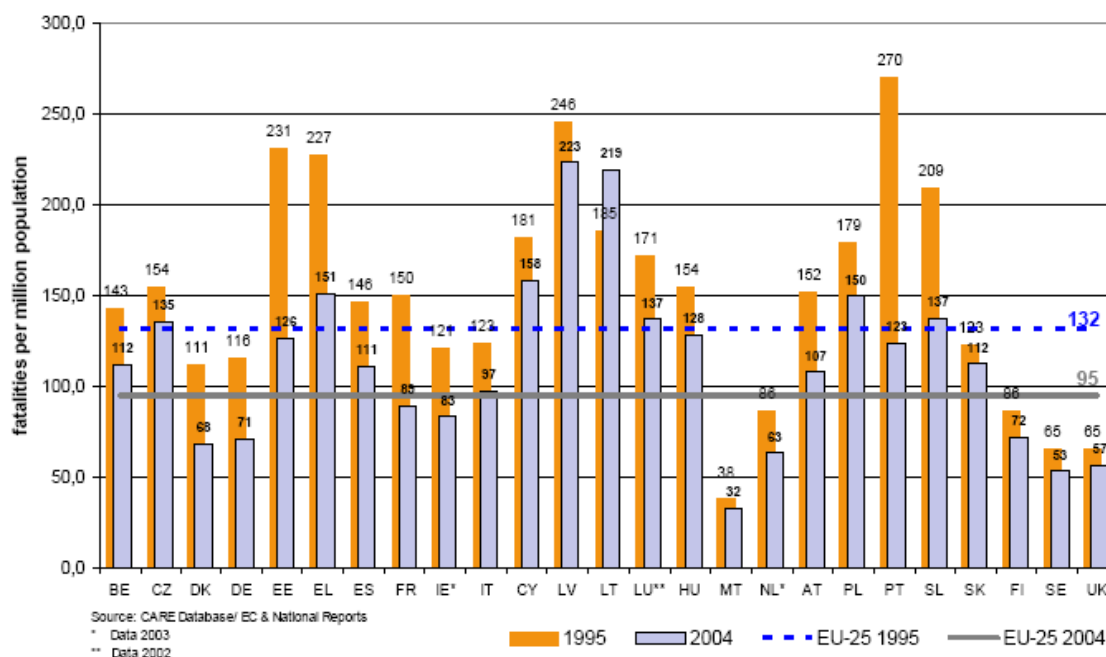


Figura nº 2.2 – Distribuição de vítimas mortais (UE-25), período de 1995 a 2004.

2.4. Em Portugal

2.4.1 Caracterização comparativa com a UE

Portugal tem registado uma evolução extraordinária no combate à sinistralidade rodoviária, aproximando-se actualmente ao valor médio de vítimas mortais por milhão de habitantes da EU. Portugal foi o país que apresentou a descida mais significativa de vítimas mortais desde o ano de 1995. Tendo por esse motivo recebido um prémio, atribuído pela União Europeia, em 2008.

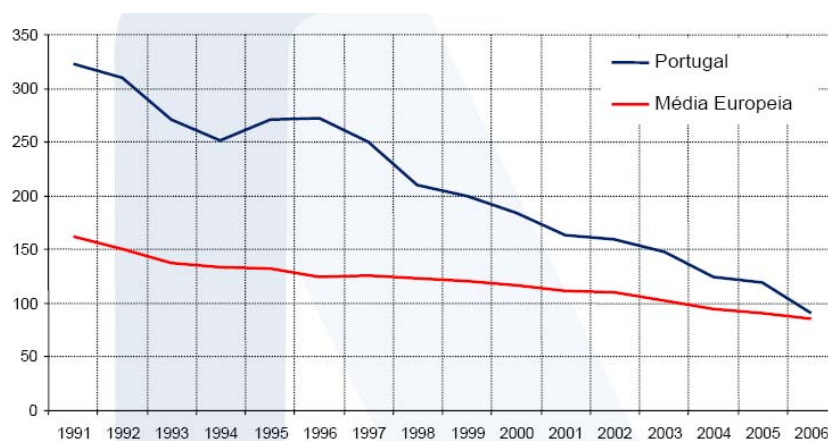


Figura nº 2.3 – Evolução do Número de vítimas mortais por milhão de habitantes em Portugal e na EU-25.

Feita a análise da evolução do número de vítimas mortais em Portugal, comparativamente à evolução do valor médio na EU-25, verifica-se que Portugal passou de uma diferença de 105% em 1995, para uma diferença de 7,7 % em 2006. O que corresponde a uma diferença total de 96,8% de redução de vítimas mortais em relação à média da EU.

Quadro 2.3 – Comparação da evolução do número de vítimas mortais entre Portugal e o valor médio da EU-25.

Ano	EU-25	Taxa Variação (%)	Portugal	Taxa Variação	Taxa Variação Comparativa(%)
1995	132	-	270	-	104,5%
2004	96	-27,3%	123	-54,4%	28,1%
2006	(90)?	-31,8%	97	-64,0%	7,7 %

No ano de 2007 foram registados 35.311 acidentes com vítimas, de que resultaram 854 mortos e 3116 feridos graves (ANSR, 2008). O número de mortos apurado corresponde ao número de vítimas que pereceram no local do acidente ou na sua deslocação até ao hospital. Pelo que para a contabilização do número de vítimas mortais a 30 dias, valor de referência europeu, torna-se necessário multiplicar aquele valor pelo coeficiente de correcção de 1,14, que corresponde a 14%, (DGV, 2000). Assim, o número de vítimas mortais a 30 dias, no ano de 2007, estimou-se em 974 mortos.

Face à gravidade do fenómeno da sinistralidade rodoviária em Portugal, o governo Português, no ano de 2003, elaborou o primeiro Plano Nacional de Prevenção Rodoviária (PNPR), onde apresentou como objectivos prioritários, a atingir até 2010, a redução em 50% das vítimas em geral e, em particular, em 60% das vítimas relacionadas com peões, com utentes de veículos de duas rodas com motor e com utentes no interior das localidades.

Dos objectivos propostos alguns foram alcançados antecipadamente, conforme se pode observar pelo quadro 2.4, não tendo sido ainda possível cumprir a diminuição em 60% das vítimas mortais de utentes no interior das localidades e de veículos de duas rodas com motor.

Quadro 2.4 – Tabela comparativa sobre o cumprimento dos objectivos do PNPR.

	Média (1998-2000)	2007	Taxa de Variação (%)	Objectivos 2010
Acidentes c/ vítimas:	47 148	35 311	-25,1%	
Mortos	1 748	854 (*)	-51,1%	874 (-50%)
Feridos Graves	7 597	3 116	-58,9%	3 799 (-50%)
Acidentes Dentro Localidades:	31 569 (?)	24 842	-21,3%	
Mortos	718	341	-52,5%	287 (-60%)
Feridos Graves	4 715	1793	-61,9%	1886 (-60%)
Atropelamentos de Peões:		5 377		
Mortos	346	137	-60,4%	138 (-60%)
Feridos Graves	1538	619	-59,7%	615 (-60%)
Acid.Veículos 2 rodas c/motor:		8 363		
Mortos	438	189	-56,8%	175 (-60%)
Feridos Graves	2227	808	-63,7%	891 (-60%)

(*) Deve referir-se que os valores de vítimas mortais constantes da tabela anterior não estão corrigidos com o factor de correcção de 1,14.

Todavia, apesar do sucesso obtido, continuamos muito afastados dos países com melhores padrões de segurança rodoviária, como sejam o caso da Suécia, do Reino Unido e da Holanda, com 53, 57 e 63 vítimas mortais por milhão de habitantes, respectivamente. Sendo que nestes países o objectivo político estabelecido é o da “Visão Zero”, ou seja, zero vítimas.

O sucesso alcançado por Portugal desde 1988 até 2007 é justificado, pela ANSR, através de um conjunto de medidas que foram sendo implementadas ao longo do tempo.

Designadamente, várias alterações ao Código da Estrada, a criminalização da condução sob o efeito do álcool, a inspecção periódica obrigatória dos veículos, os limites de velocidade, o uso de cintos de segurança, entre outras.

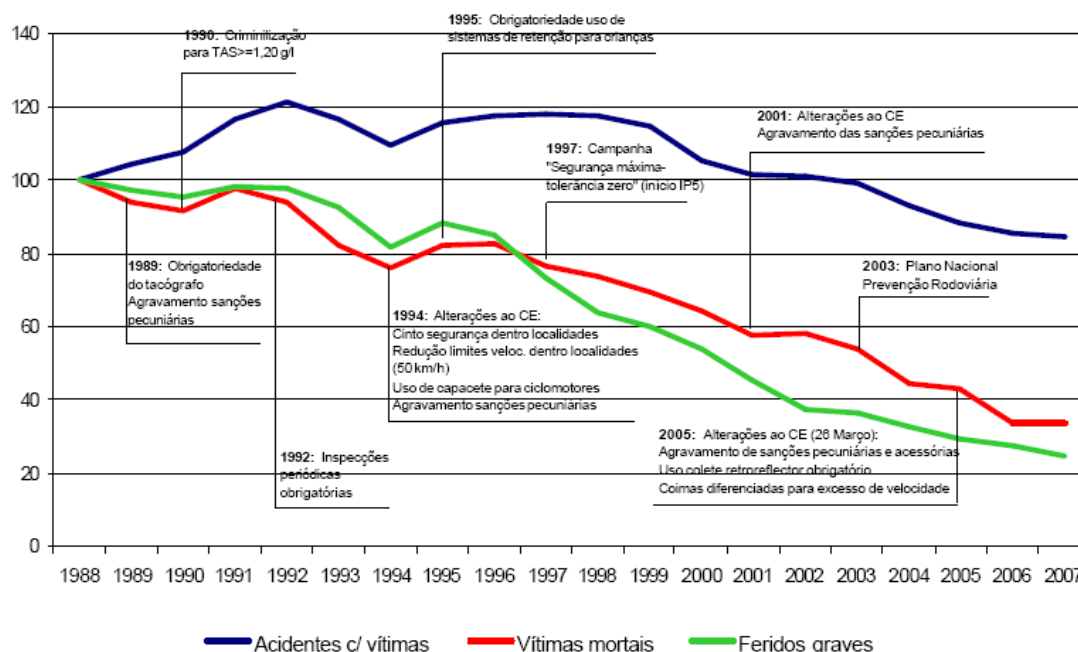


Figura 2.4 – Medidas de segurança rodoviária e indicadores de sinistralidade – 1988-2007.

Porém, não podemos esquecer a evolução da qualidade do parque automóvel e das infra-estruturas rodoviárias, sobretudo, das suas características de segurança activa e passiva.

Segurança activa – por segurança activa entendem-se os instrumentos e equipamentos que visam evitar os acidentes. Como exemplo podemos referir o sistema “ABS” nos veículos e o pavimento drenante nas vias.

Segurança passiva – por segurança passiva entendem-se os instrumentos e equipamentos que visam mitigar as consequências dos acidentes. Como exemplo apontam-se o “AirBag” nos veículos e as guardas de protecção lateral nas vias.

2.4.2 Caracterização da sinistralidade grave no ano de 2007

Nesta secção vou caracterizar, brevemente, a sinistralidade grave ocorrida no território continental, no ano de 2007, num universo de 35311 acidentes com vítimas, de que resultaram um total de 854 vítimas mortais e 3116 feridos graves. Por sinistralidade grave entendem-se os acidentes de que resultaram vítimas (mortos e/ou feridos). Para esta caracterização são utilizados os dados da sinistralidade rodoviária publicados anualmente pela ANSR. Procurou-se enfatizar a descrição estatística dos factores que intervêm no sistema rodoviário,

designadamente, a via, o veículo, o condutor e o ambiente. São também descritos os dados referentes à distribuição temporal e espacial do fenómeno, à tipologia de acidentes e das vítimas.

2.4.2.1 Distribuição temporal da sinistralidade

Os acidentes com vítimas registaram-se em maior número nos meses de verão. O número de vítimas acompanhou, na generalidade, a distribuição do número de acidentes, com excepção do número de vítimas mortais, nos meses de Março e de Novembro. Deve recordar-se que no mês de Novembro ocorreu o acidente com o maior número de mortos conhecido em Portugal. Tratou-se de uma colisão lateral ocorrida entre um veículo ligeiro de passageiros e um veículo pesado de passageiros (autocarro) na Auto-estrada nº 23 no distrito de Castelo Branco, de que resultaram 13 vítimas mortais.

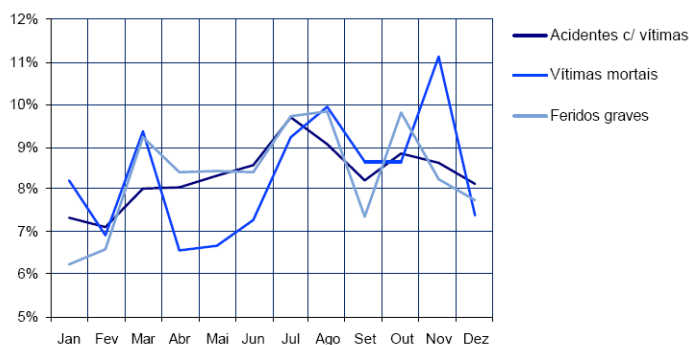


Figura 2.5 – Distribuição da sinistralidade por meses do ano.

Observado o fenómeno por dias da semana verifica-se um incremento percentual significativo de vítimas nos dias de fim-de-semana.

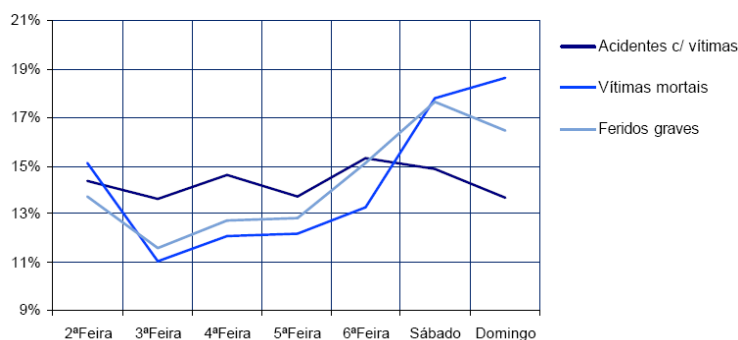


Figura 2.6 – Distribuição da sinistralidade por dias da semana.

Observado o fenómeno pelas horas do dia verifica-se que a sinistralidade evolui desde o amanhecer até ao anoitecer. Verificando um agravamento dos acidentes ocorridos durante a noite e sobretudo de madrugada.

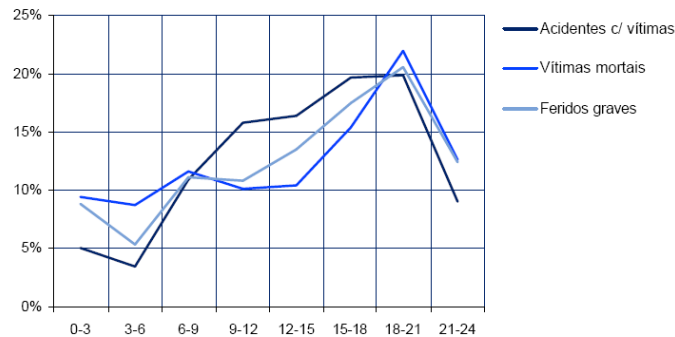


Figura 2.7 – Distribuição da sinistralidade pelas horas do dia.

2.4.2.2 Distribuição de acordo com a localização espacial

De acordo com a localização espacial, verifica-se que 70% dos acidentes ocorreram dentro das localidades. Porém, a maior percentagem de vítimas mortais verificou-se fora das localidades.

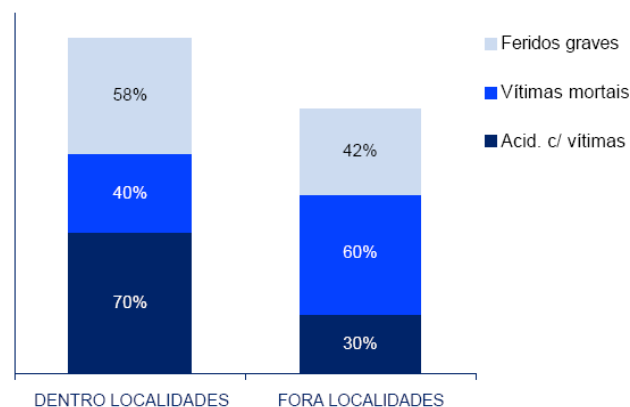


Figura 2.8 – Distribuição de acordo com a localização espacial

No que diz respeito ao tipo de via verifica-se que a maior percentagem de acidentes ocorreram em arruamentos, seguindo-se as estradas nacionais (EN) e as estradas municipais (EM). Os itinerários principais e complementares (IP/IC) foram os tipos que registaram menos acidentes graves.

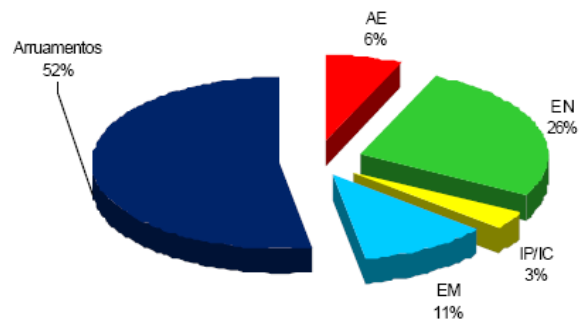


Figura 2.9 – Distribuição de acordo com o tipo de via.

2.4.2.3 Distribuição pelas características dos veículos intervenientes

Os tipos de veículos que em maior percentagem contribuíram para a sinistralidade foram os veículos ligeiros, seguidos dos ciclomotores e dos motociclos.

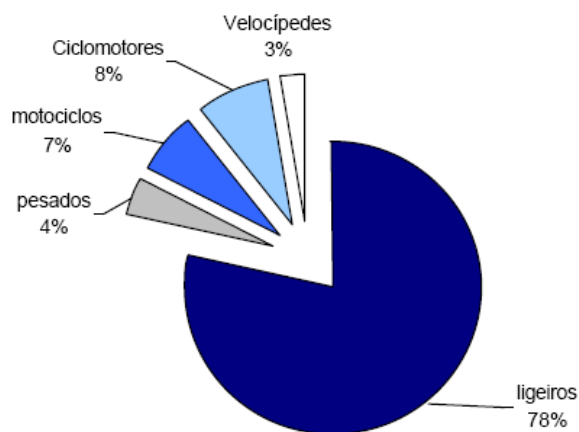


Figura 2.10 – Distribuição pelo tipo de veículos intervenientes.

Pela idade dos veículos verificou-se que aqueles que se situam no escalão entre os 5 e os 9 anos foram os que mais contribuíram para a sinistralidade grave.

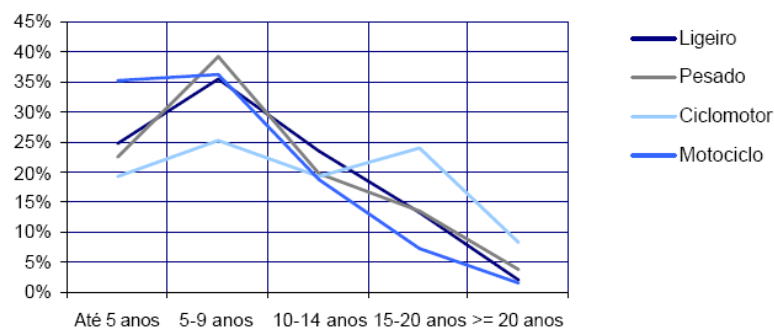


Figura 2.11 – Distribuição pela idade do veículo.

2.4.2.4 Caracterização dos condutores

De acordo com o escalão etário, os condutores que maioritariamente contribuíram para a sinistralidade grave encontram-se nos escalões entre os 20 e os 59 anos.

No concernente à distribuição da sinistralidade grave por sexo, verifica-se que os condutores do sexo masculino contribuíram para um maior número de acidentes.

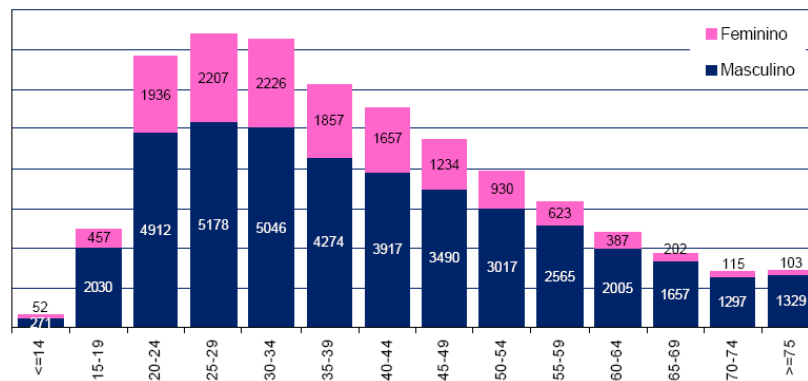


Figura 2.12 – Distribuição da sinistralidade por escalões etários e sexo dos condutores.

Observando as acções e manobras que os condutores realizavam no momento em que ocorreram os acidentes, verificou-se que estes, maioritariamente, seguiam em marcha normal.

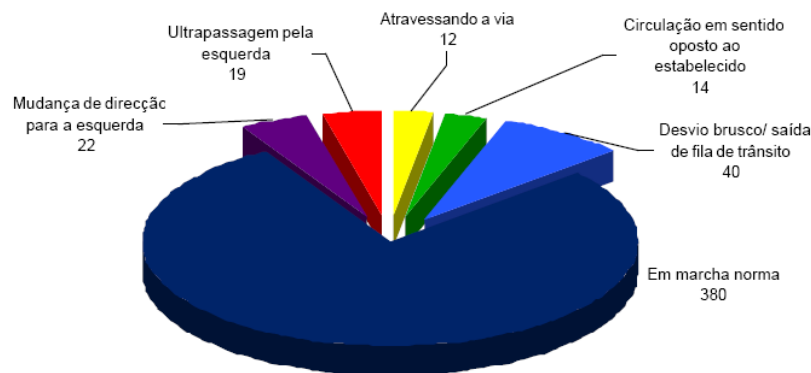


Figura 2.13 – Distribuição de acções e manobras que antecederam os acidentes.

2.4.2.5 Distribuição de acordo com as condições ambientais

De acordo com as condições atmosféricas, verifica-se que a maior percentagem de acidentes ocorrem em dias com bom tempo. Todavia, convém lembrar que, ao longo do ano, são em muito maior número os dias com boas condições atmosféricas.

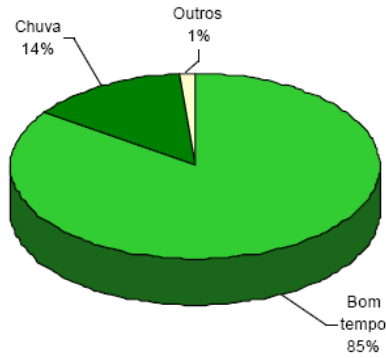


Figura 2.14 – Distribuição de acordo com as condições atmosféricas.

2.4.2.6 De acordo com a tipologia de acidente

Observada a tipologia de acidentes, verifica-se que a maior percentagem de acidentes se deveu a colisões, seguida de despistes e por fim de atropelamentos.

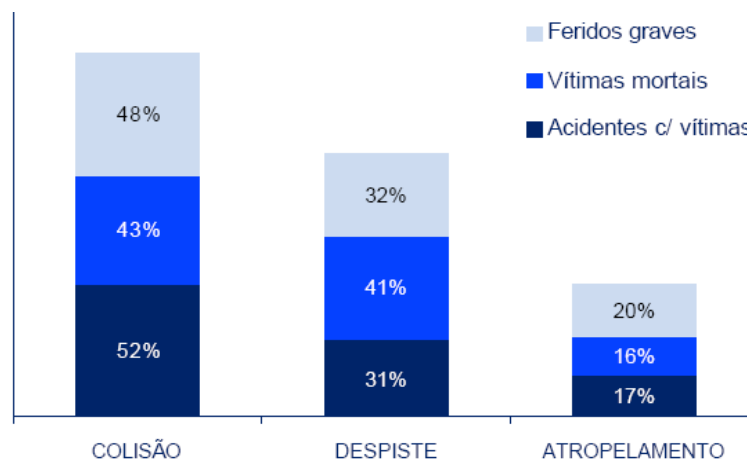


Figura 2.15 – Distribuição da sinistralidade pela tipologia de acidentes.

2.4.2.7 Caracterização das vítimas

Analisadas as vítimas, por escalão etário, verifica-se que o maior número de vítimas situa-se nos escalões etários entre os 20 e os 44 anos, seguindo-se o escalão etário superior a 65 anos. Por tipo de veículo, os veículos ligeiros foram os que provocaram mais vítimas mortais seguidos dos veículos de duas rodas. Os atropelamentos foram a terceira maior causa de vítimas mortais.

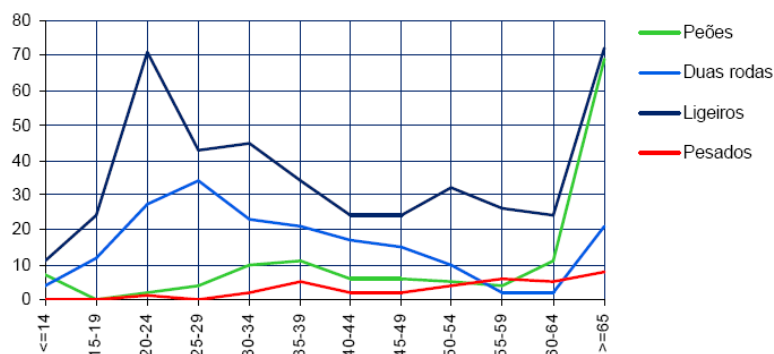


Figura 2.16 – Distribuição etária das vítimas pelo tipo de veículo que as produziu.

Os peões foram maioritariamente atropelados dentro das localidades.

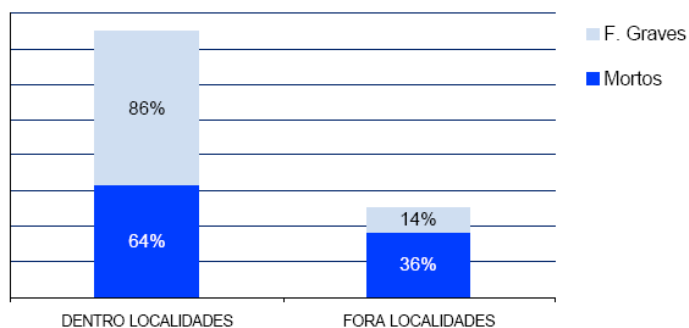


Figura 2.17 – Peões vítimas pela localização do atropelamento.

No concernente às acções que executavam, 24% dos peões circulavam em plena faixa de rodagem e 15% atravessava fora da passagem para peões.

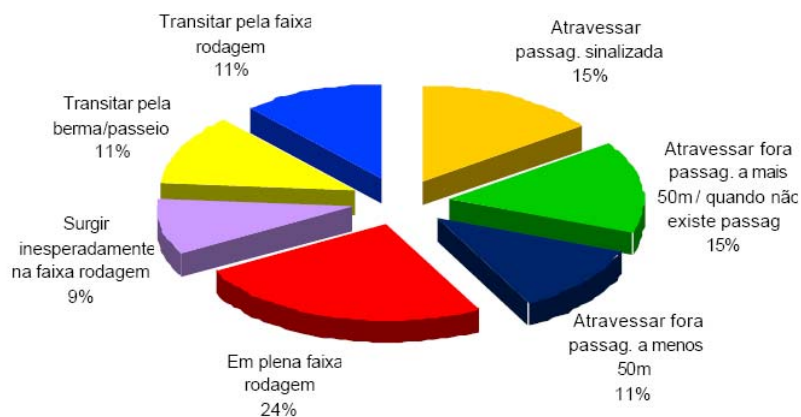


Figura 2.18 – Tipo de acções executadas pelos peões mortos.

Pelo tipo de via, os peões mortos foram maioritariamente atropelados nos arruamentos, seguidos das Estradas Nacionais.

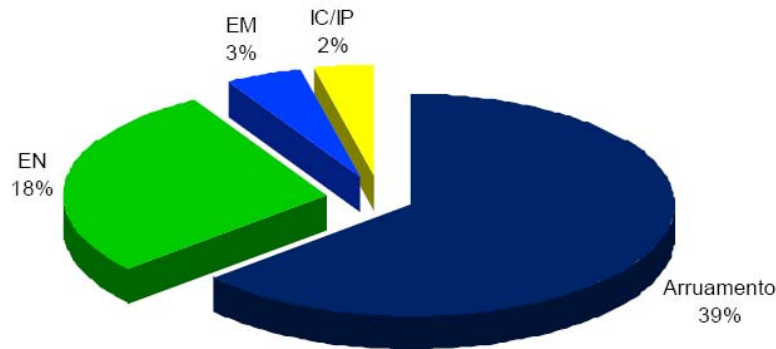


Figura 2.19 – Distribuição dos peões mortos pelo tipo de via.

2.5. Causas da Sinistralidade Rodoviária

Em Portugal, até ao ano de 2006, não existiam dados nem estudos conhecidos sobre as causas dos acidentes de viação. O primeiro estudo conhecido com este fim foi realizado pela Secção de Investigação Criminal da BT/GNR em conjunto com o Departamento de Saúde Pública da Universidade Nova de Lisboa.

Este estudo visou identificar as causas principais e secundárias de um universo de 903 acidentes de viação, de que resultaram vítimas mortais, ocorridos no ano de 2005, nas estradas portuguesas da jurisdição da Guarda Nacional Republicana, que corresponde a 96% do território continental e em que estiveram envolvidos 1.387 condutores, de que resultaram 1.012 vítimas mortais, conclui-se que em 92% dos casos os acidentes deveram-se a falhas do factor humano, 6% a falhas da via e 2% a falhas do veículo (Leal; Brito; Marcelino; Batista; 2006).

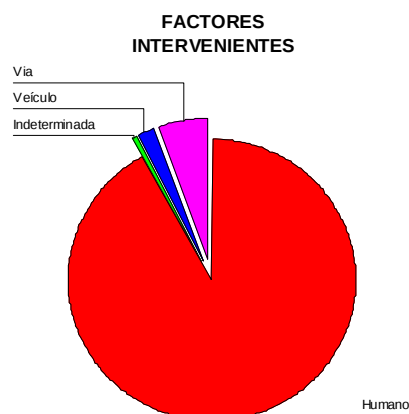


Figura 2.20- Factores responsáveis pela sinistralidade rodoviária.

Neste estudo concluiu-se que o factor humano foi responsável por 92% das principais causas dos acidentes investigados.

No que concerne ao factor humano, as variáveis avaliadas e a sua contribuição para a ocorrência dos acidentes de viação foram as que se observam no quadro seguinte.

Quadro 2.5 - Causas humanas da sinistralidade rodoviária.

Causas Humanas	Influência (%)
Velocidade Inadequada	30,33
Infracção às Normas Rodoviárias	23,58
Distracção	11,29
Comportamento do Peão	6,64
Inexperiência/Falta de Perícia	5,31
Erros de Percepção	5,09
Condições Psico-físicas	3,65
Imprudência	3,09
Doença Súbita	2,98
Total	91,96

2.5.1 Outros Estudos

Depois de se ter feito uma pesquisa no sentido de encontrar outros estudos sobre as causas do fenómeno da sinistralidade, encontraram-se dois que se consideram muito importantes pelas suas conclusões.

2.5.1.1 Realizado pela Universidade de Indiana (EUA)

O primeiro estudo a citar, foi realizado por Treat et al. (1977) na Universidade de Indiana, nos EUA, e feito, em profundidade, sobre 420 acidentes com vítimas.

Quadro 2.6 – Responsabilidade dos diferentes factores da sinistralidade.

Factor	Humano (H)	Meio (M)	Veículo (V)
H	57,1	26,4	6,2
M	26,4	3,3	1,2
V	6,2	1,2	2,4
H + M + V	2,9	2,9	2,9
TOTAL	92,6	33,8	12,7

Neste estudo, os autores concluíram que o factor humano foi responsável por 92,6% daqueles acidentes, em associação com os outros factores intervenientes.

2.5.1.2 Realizado pela NHTSA (EUA)

Num outro estudo, realizado também nos EUA, por Hendrichs, Fell e Freedman (1997), a pedido da National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA), os autores concluíram que o factor humano foi responsável por 91,2% dos casos de acidentes observados, considerado este factor isoladamente.

Para o efeito foram estudados 723 acidentes graves, ocorridos em quatro locais distintos, nos EUA, no período compreendido entre os dias 01 de Abril de 1996 e 30 de Abril de 1997 e em que estiveram envolvidos 1284 condutores.

As causas humanas isoladas e as associadas com outros factores e o seu contributo para os acidentes foram as que se observam no quadro seguinte.

Quadro 2.7 - Causas primárias isoladas e associadas da sinistralidade.

Causal Category	Assignment Level	% of Drivers Contributing To Causation		
		10	20	30
DRIVER INATTENTION	Primary (Sole Factor)	16.7		
	Primary (In Combination)	5.2		
	Contributory	0.8		
Total		22.7		
VEHICLE SPEED	Primary (Sole Factor)	6.8		
	Primary (In Combination)	3.8		
	Contributory	8.1		
Total		18.7		
ALCOHOL IMPAIRMENT	Primary (Sole Factor)	6.0		
	Primary (In Combination)	11.1		
	Contributory	1.1		
Total		18.2		
PERCEPTUAL ERRORS (Looked, Did Not See)	Primary (Sole Factor)	8.9		
	Primary (In Combination)	0.1		
	Contributory	0.1		
(Accepted Inadequate Gap)	Primary (Sole Factor)	6.0		
Total		15.1		
DECISION ERRORS (Turn/Cross With Obstructed View) (Violated Red Signal) (Attempted To Beat Phasing Signal) (Violated Stop Sign)	Primary (Sole Factor)	4.7		
	Primary (Sole Factor)	2.6		
	Primary (Sole Factor)	2.1		
	Primary (Sole Factor)	0.7		
Total		10.1		
INCAPACITATION (Fell Asleep) (Seizure/Blackout/etc.)	Primary (Sole Factor)	4.4		
	Primary (Sole Factor)	2.0		
		6.4		
Total		6.4		
Causal Category	Assignment Level	% of Drivers Contributing To Causation		
		10	20	30

NOTE: Due to multiple causal factor assignments, proportions for individual causal factors add to more than 100.0.

Quadro 2.8 – Resumo do quadro anterior.

Causas Humanas	Influência (%)
Falta de Atenção	22,7
Velocidade de Circulação	18,7
Influência do Álcool	18,2
Erros de Percepção	15,1
Erros de Decisão	10,1
Incapacidade Física	6,4
Total	91,2

Feito o resumo da tabela anterior e comparando ambos os estudos, verifica-se que a distribuição percentual de algumas causas não é semelhante, o que se poderá dever ao facto de se encontrarem agrupadas de modo diferente. Em todo o caso, o que se pretende realçar com os estudos citados prende-se com o tipo de variáveis utilizadas para caracterizar o factor humano e a sua intervenção como causa principal dos acidentes.

Por outro lado, face à diferença estatística do factor humano na contribuição para a ocorrência dos acidentes, relativamente aos outros factores do sistema, conclui-se que as medidas de intervenção a preconizar, de modo a controlar o fenómeno da sinistralidade, deverão orientar-se sobretudo para as falhas do factor humano.

2.6. Custos sócio-económicos da sinistralidade rodoviária

Os custos económicos dos acidentes e das lesões representam 1% do PIB dos países subdesenvolvidos, 1,5% dos países em desenvolvimento e 2% dos países desenvolvidos.

Um estudo realizado pela European Transport Safety Council (ETSC) estimou o custo médio de uma vítima em cerca de 3,6 milhões de euros, contabilizadas as despesas directamente decorrentes do sinistro e da riqueza perdida pela morte prematura das vítimas.

Em Portugal o custo estimado, em 2001, foi de 2 mil milhões de euros, o que representou 0,85% do PIB daquele ano (Donário, 2007).

2.7. Conclusões

O fenómeno da sinistralidade rodoviária é um fenómeno social considerado pela OMS um problema de saúde pública. A sua distribuição pelo Mundo é proporcional ao estado de evolução económica dos países. As zonas do Mundo onde existem melhores padrões de segurança rodoviária situam-se no continente Americano e no continente Europeu.

Portugal, apesar das várias medidas que têm vindo a ser adoptadas e dos sucessos obtidos, continua numa posição pouco favorável quando comparado com os países de menor sinistralidade rodoviária.

Feita uma caracterização geral da sinistralidade rodoviária em Portugal, constata-se que esta ocorre maioritariamente nos arruamentos do interior das localidades, seguidos das Estradas Nacionais, cujos maiores protagonistas são os condutores de veículos ligeiros, de onde resultam, naturalmente, muitas vítimas por atropelamento.

Quanto às causas que originam a sinistralidade, apesar de não existirem muitos estudos neste domínio, provavelmente, pela dificuldade de analisar isoladamente os factores intervenientes,

considerando que o sistema rodoviário só funciona pela interacção contínua dos mesmos, os estudos existentes apontam as falhas humanas como as principais causas do fenómeno.

Assim, as prioridades de actuação parecem dever orientar-se para o interior das localidades (aglomerados urbanos), para as Estradas Nacionais, para os veículos ligeiros e para o factor humano, como elemento principal do sistema rodoviário.

Deste modo, no próximo capítulo vou abordar as metodologias tradicionais de estudo e controlo do fenómeno e propor uma nova abordagem na perspectiva das ciências da complexidade e dos sistemas complexos.

“As leis físicas primárias jamais serão descobertas por uma ciência que tenta fragmentar o mundo nos seus constituintes.” (David Bohm)

Capítulo 3

METODOLOGIAS TRADICIONAIS DE ESTUDO FENOMENOLÓGICO

Em resposta à questão do capítulo anterior, neste capítulo vou abordar as metodologias tradicionais utilizadas no estudo e controlo fenomenológico, aplicados também ao fenómeno da sinistralidade rodoviária.

3 Metodologias tradicionais de estudo do fenómeno da sinistralidade rodoviária

Os acidentes de viação resultam da combinação dos factores do sistema rodoviário que compreendem a via, o ambiente, o veículo, o condutor e as circunstâncias de interacção. Alguns factores contribuem para a ocorrência dos acidentes e constituem parte da sua causa. Outros agravam as consequências do acidente, contribuindo assim para a gravidade do sinistro. Alguns factores podem não parecer directamente relacionados com a gravidade do acidente. Algumas causas directas podem ficar ocultas na determinação estrutural das causas. Identificar os factores de risco que contribuem para os acidentes de viação é importante para a preconização de medidas de intervenção que possam reduzir os riscos promovidos pelos factores intervenientes.

Alguns métodos de análise podem ser usados para identificar os factores de risco em acidentes de viação. Assim, seguidamente apresentam-se três abordagens de análise do fenómeno: a abordagem de saúde pública, a matriz de Haddon e a abordagem sistémica.

3.1 Abordagem de saúde pública

A abordagem de saúde pública (Krug, 2000) integra o método de análise genérico utilizado em diferentes campos de saúde pública para responder a uma variedade de problemas de saúde, doenças, lesões e violência (Mercy, 1993).

Esta abordagem não está orientada apenas para a análise de factores de risco, é utilizada mais como ferramenta de apoio à decisão ao longo de todo o processo de investigação, desde a identificação do problema à implementação de uma intervenção. A análise de risco é apenas um dos componentes desta abordagem, motivo pelo qual é aqui avaliada a sua aplicação aos acidentes de viação.

Esta abordagem envolve quatro níveis de acção (Fig. 3.1):

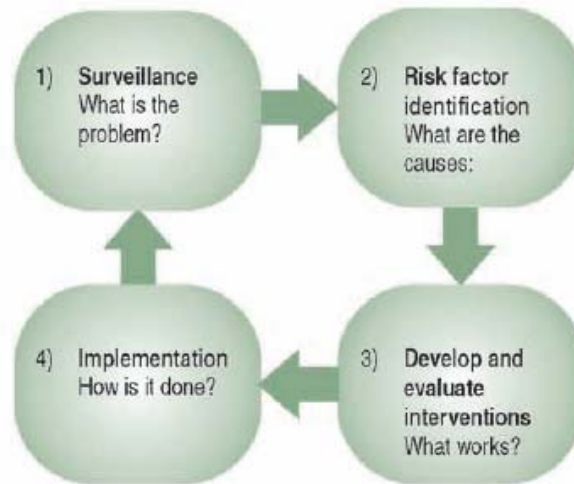


Figura 3.1 – Modelo de abordagem de saúde pública. (OMS, 2004)

- O **primeiro nível** prende-se com a determinação da magnitude, tipo e características do problema. A identificação do problema vai para além da simples contagem do número de casos, incluindo a delineação da mortalidade, da morbilidade e dos comportamentos de risco. No caso dos acidentes de viação, procura-se neste nível obter informação sobre as características demográficas da população envolvida, a identificação temporal e geográfica do incidente, as circunstâncias em que ocorreu, a gravidade das lesões e os custos associados. Portanto, são utilizados métodos qualitativos e quantitativos próprios das ciências sociais e comportamentais para identificar e caracterizar o problema.

- O **segundo nível** destina-se a identificar os factores que potenciaram o risco de enfermidade, lesão e incapacidade e determinar quais dos factores poderão ser potencialmente modificados. Considerando que no primeiro nível se procura responder a *quem, quando, onde, o quê e como*, este nível procura responder ao *porquê*. Este nível é utilizado para identificar populações de elevado risco e sugerir intervenções específicas.

- No **terceiro nível** procura-se identificar as medidas que poderão ser utilizadas para prevenir o problema, utilizando a informação acerca das causas e dos factores de risco para o desenvolvimento de acções piloto e avaliação dos resultados. Os métodos utilizados neste nível prendem-se com experiências controladas, comparação de populações objecto do mesmo fenómeno, pesquisa bibliográfica, análises de tendências e estudos por observação. Por fim efectua-se a avaliação do impacto da intervenção restrita.

- No **quarto nível** procede-se à implementação das medidas de intervenção aprovadas ou que apresentaram resultados favoráveis numa determinada escala de medida. Seguidamente

realiza-se a avaliação do programa de intervenção através dos resultados obtidos na diminuição dos acidentes e das vítimas.

3.2 Matriz de Haddon

William Haddon desenvolveu uma matriz (Fig. 3.2) para identificação de factores de risco - antes, durante e depois do acidente - relacionados com as pessoas, o veículo e o ambiente. Haddon descreveu o transporte por estrada como um sistema “homem-máquina” mal concebido que devia ser objecto de um tratamento sistémico integral. Cada fase – antes, durante e após o acidente – pode ser sistematicamente analisado pelos factores humano, da via, do veículo e do ambiente.

Esta matriz é uma ferramenta de análise para ajudar a identificar todos os factores associados ao acidente. Uma vez identificados e analisados os múltiplos factores envolvidos num acidente, podem desenvolver-se medidas de implementação a curto e a longo prazo. Assim, as medidas a tomar deverão estar associadas a cada fase específica do acidente, com vista a evitar a sua ocorrência.

FACTORS				
PHASE		HUMAN	VEHICLES AND EQUIPMENT	ENVIRONMENT
Pre-crash	Crash prevention	Information Attitudes Impairment Police enforcement	Roadworthiness Lighting Braking Handling Speed management	Road design and road layout Speed limits Pedestrian facilities
Crash	Injury prevention during the crash	Use of restraints Impairment	Occupant restraints Other safety devices Crash protective design	Crash-protective roadside objects
Post-crash	Life sustaining	First-aid skill Access to medics	Ease of access Fire risk	Rescue facilities Congestion

Figura 3.2 – Matriz de Haddon. (OMS, 2004)

A Matriz de Haddon aborda o problema do acidente articulando os factores que compõem o sistema rodoviário em variáveis de estado elementares, de acordo com a sequência de fases em que aquele se desenvolve: pré-acidente, acidente e pós-acidente.

3.3 Abordagem sistémica

Tradicionalmente, a análise de factores de risco de acidentes depende da avaliação separada dos factores que constituem o sistema rodoviário, designadamente o condutor, a via, o veículo e o ambiente, com uma tendência para observação isolada de um ou outro factor.

Construída a partir da matriz de Haddon, a abordagem sistémica observa a interacção dos diferentes componentes e procura identificar e corrigir as maiores fontes de erro ou os elos mais fracos, que contribuem para os acidentes, assim como mitigar a severidade das suas consequências. A essência do uso desta abordagem está em considerar não só os factores fundamentais mas também o papel dos diferentes agentes e actores no esforço preventivo. Os acidentes de viação são um problema multidimensional que requer uma observação abrangente das determinantes, das consequências e das soluções.

O sistema rodoviário é altamente complexo e perigoso para a saúde humana. Os elementos do sistema incluem veículos, estradas e utentes e o seu ambiente físico, social e económico. Construir um sistema rodoviário menos perigoso requer uma abordagem sistémica, ou seja, compreender o sistema como um todo e as interacções entre os seus elementos, e identificar onde existe o potencial para intervenção. Em particular, há que reconhecer que o corpo humano é altamente vulnerável à lesão e que os seres humanos normalmente cometem erros. Um sistema rodoviário seguro é um espaço complacente que compensa as vulnerabilidades e as falhas humanas (Peden, 2004).

Cada acidente e as suas consequências podem ser representados pela relação entrelaçada de interacções dos factores. Em resultado da interacção dos componentes da estrada e do trânsito, surgem ligações entre os acidentes e os factores traumáticos. Por exemplo as características de algumas estradas ou dos veículos podem influenciar o comportamento dos utentes, assim como as falhas de alguns veículos podem dever-se às características da via. Daí que, para o planeamento de medidas preventivas, se considere essencial compreender todo um processo complexo de causalidade, o qual contém informação vital sobre a amplitude de possíveis áreas de acções preventivas. Esta abordagem constitui a possibilidade de intervir em todos os aspectos do sistema rodoviário para reduzir os riscos de acidentes e de mortes. A mensagem chave a reter é a de que um acidente é o resultado da interacção entre vários factores e subsistemas.

Se os acidentes se reduzissem a uma só causa era óbvio que os componentes do sistema, homem, veículo e infra-estrutura, seriam necessariamente considerados independentes. E as medidas dirigidas a qualquer um dos componentes poderiam ser implementadas separadamente, facilitando assim a acção das entidades responsáveis pelas diferentes áreas de intervenção que não se sentiriam obrigadas a coordenar as medidas com outras entidades. Daqui resultaria que a influência entre os factores seria ignorada. A mudança de um modelo simples de segurança rodoviária para uma abordagem sistemática implica um esforço

considerável na aquisição de conhecimento sobre a natureza dos acidentes. Este esforço é compensado pela abertura de um amplo campo de oportunidades para acções preventivas e pelo desenho mais apropriado de medidas. Obter conhecimento suficiente sobre o perigo implicitamente gerado por cada factor implica analisar a cadeia de eventos que originam os acidentes e as lesões. A análise detalhada dos acidentes, tanto devidos ao factor humano como aos componentes físicos e técnicos da estrada e do trânsito, requer uma abordagem multidisciplinar.

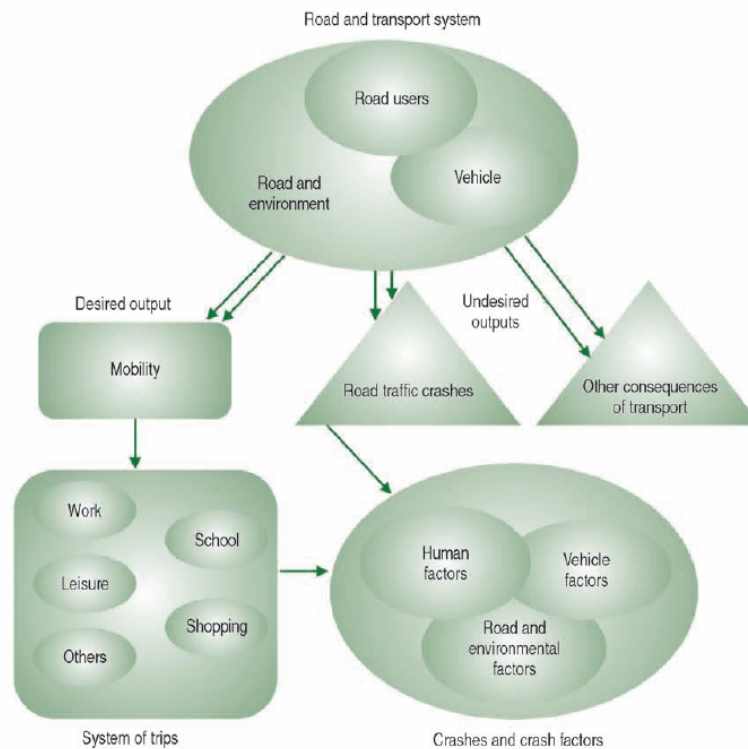


Figura 3.3 – Modelo de abordagem sistémico. (OMS, 2004)

A figura 3.3 pretende modelar o sistema rodoviário e de transporte de acordo com os efeitos desejados e não desejados. Os efeitos desejados prendem-se com a mobilidade e a satisfação das necessidades de deslocação e os indesejados com os acidentes de viação e os factores que os podem potenciar.

Esta abordagem, face à complexidade do sistema rodoviário e da interacção das suas partes, aponta já para a necessidade do estudo sistemático e multidisciplinar do fenómeno, com vista ao melhor conhecimento da sua natureza e à preconização de medidas preventivas mais apropriadas. Para isso, o caminho apontado dirige-se na produção de mais conhecimento, todavia, não são referidas novas metodologias científicas.

3.4 Ferramentas sistémicas de estudo da sinistralidade rodoviária

As ferramentas aqui referidas são o corolário das abordagens citadas e consistem em bases de dados. Estas consistem em aplicações informáticas de recolha sistemática de dados sobre o fenómeno da sinistralidade, a partir das quais se têm tomado as medidas preventivas de combate ao fenómeno.

Na UE não existe uma base de dados comum. Cada país possui a sua própria base de dados, os quais fornece à European Road Safety Observatory (ERSO) para conhecimento geral do problema a nível europeu. Todavia, existe a intenção de uniformizar os procedimentos de estudo e controlo fenomenológico através da implementação da base de dados “*Community Accident Data Set*” (CADas), que se encontra em desenvolvimento e está a ser construída a partir de uma base de dados mais antiga designada por “Community Database on Accidents on the Roads in the Europe” (CARE). A base de dados CADas reúne 88 variáveis, divididas por um total de 481 indicadores, sobre os factores que compõem o sistema rodoviário, o que representa uma evolução face aos 260 indicadores da versão original CARE.

Em Portugal também existe desde 01 de Janeiro de 1987 uma base de dados para a recolha de informação sobre a sinistralidade, a qual foi sofrendo alterações até à actualidade, tendo a última ocorrido em Janeiro de 2004. Esta base de dados é carregada pelas forças de segurança com responsabilidade para o registo da sinistralidade e para a aplicação das políticas operacionais de combate e controlo do fenómeno, nomeadamente, a Guarda Nacional Republicana (GNR) e a Polícia de Segurança Pública (PSP). Esta base de dados está centralizada na Autoridade Nacional de Segurança Rodoviária (ANSR) sendo carregada através de um formulário designado por Boletim Estatístico de Acidentes de Viação (BEAV). O BEAV possui 55 variáveis para caracterizar os factores que compõem o sistema rodoviário, a que correspondem 220 indicadores. Esta ferramenta tem estado na origem dos estudos conhecidos sobre o fenómeno em Portugal e que deram suporte à análise descrita sobre o fenómeno no capítulo anterior.

Recentemente, na sequência da atribuição de competências de investigação criminal àquelas mesmas forças de segurança, pela Lei da Organização de Investigação Criminal (LOIC, 2000), aquelas forças policiais tiveram de implementar serviços específicos de investigação criminal. Considerando que os acidentes de viação de que resultam vítimas (mortos e feridos) são considerados crimes, de homicídio e de ofensas à integridade física, (Código Penal, 2007), uma das actividades de investigação criminal prendeu-se concretamente com os

acidentes de viação, pelo que foram criadas naquelas forças estruturas específicas para a investigação operacional de crimes em acidentes de viação com vista ao apuramento dos seus autores e das suas causas. Assim, a GNR, através da Brigada de Trânsito, unidade especialmente vocacionada para o estudo, combate e controlo da sinistralidade, criou uma nova base de dados designada por Formulário de Investigação de Crimes em Acidentes de Viação (FICAV), com o fim de integrar a nova informação produzida pela estrutura de investigação criminal de acidentes de viação, homogeneizar a recolha de dados, melhorar a qualidade da informação e permitir o estudo sistemático mais aprofundado do fenómeno. Esta base de dados possui 86 variáveis (com 531 indicadores) para caracterizar os componentes do sistema rodoviário, a gestão dos processos e as causas de cada acidente.

Quadro 3.1 - Comparação de ferramentas de estudo sistémico da sinistralidade rodoviária.

Dimensões	BEAV	CARE	CADAs	FICAV
Processo	0	0	0	(10) 40
Acidente	(12) 47	30	(12) 91	(9) 60
Veículo	(13) 43	66	(17) 117	(8) 67
Via	(20) 78	57	(37) 166	(21) 134
Pessoas	(24) 115	107	(22) 107	(34) 199
Causas	0	0	0	(4) 31
Total	(55) 220	260	(88) 481	(86) 531

A novidade trazida por esta nova ferramenta prende-se com a maior quantidade de informação, comparativamente com o BEAV e com a CARE, e ainda com o controlo e gestão dos processos-crime e a identificação das causas da sinistralidade, comparativamente com todas as bases de dados referidas.

O registo das causas do acidentes, investigados quando simultaneamente constituam crimes, constitui a mais-valia da base de dados FICAV, dimensão omissa nas restantes bases de dados, motivo pelo qual ainda hoje não existe conhecimento sobre as causas da sinistralidade em Portugal. Esta ferramenta iniciou oficialmente funções em 1 de Agosto de 2008.

Em consonância com a base de dados FICAV, a European Automobile Manufacturers Association (ACEA) em conjunto com European Accident Causation Survey (EACS), com o suporte da Comissão Europeia e a égide da European Road Safety Federation (ERSF), integrando quatro países da U.E. (Alemanha, Itália, Finlândia e França) desenvolveram uma base de dados para estudos científicos projectivos sobre as causas dos acidentes de viação. Para o efeito, tiveram a colaboração de várias universidades e laboratórios. Para uma análise profunda da interacção entre o veículo, o condutor e o ambiente rodoviário conceberam o

seguinte modelo sistémico de abordagem da segurança rodoviária (Chenisbest, B., Jahn, N., Coz, J., 1997).

Quadro 3.2 - Base de dados sistémico do conflito rodoviário.

		Sub-Systems		
		Drivers	Vehicles	Infrastructures
SITUATINOS	Pre-conflict- Design/Training Wear/Life	Psychological Sensorial Cognitive Motor	Ergonomic Dynamic Interactions	Geometry Grip Signing Visibility Equipment
	Conflict	Perception Processing Action	Space-time Interactions	Dynamic

A presente base de dados reúne todos os factores e dimensões que integram o sistema rodoviário, importando realçar as dimensões relacionadas com o factor humano: psicológicas, sensoriais, cognitivas e motoras, que se resumem ao processo integrado de percepção, processamento e acção. Esta ferramenta é carregada pelo preenchimento de 821 itens a preencher em todos os acidentes investigados.

A base de dados FICAV, da GNR, destina-se ao estudo científico do fenómeno da sinistralidade rodoviária em 96% do território continental, com vista à preconização de medidas de intervenção preventivas do fenómeno na sua Zona de Acção.

3.5 Conclusões

Neste capítulo pretendeu-se descrever e caracterizar as metodologias mais comumente utilizadas no estudo e controlo do fenómeno da sinistralidade, designadamente, a abordagem de saúde pública, a matriz de Haddon e a abordagem sistémica. Todas estas abordagens estão de algum modo interligadas. A abordagem de saúde pública prende-se sobretudo com o apoio à decisão sobre as políticas e as medidas de segurança rodoviária. A matriz de Haddon visa gerar uma perspectiva de observação sistemática do fenómeno enquanto a abordagem sistémica, mais elaborada, identifica as partes do sistema e as suas relações de interactividade.

Seguidamente, identificaram-se algumas ferramentas de análise estatística desenvolvidas por alguns países da UE para estudar o fenómeno. Foi feita uma referência especial às potencialidades do FICAV, a ferramenta recentemente desenvolvida pela GNR. Todas estas ferramentas procuram seguir a abordagem sistémica, na medida em que reúnem uma grande quantidade de informação sobre o fenómeno, recolhida a partir da análise das suas partes. A

informação recolhida nestas bases de dados serve para apoiar a decisão das entidades responsáveis pelo controlo do fenómeno da sinistralidade rodoviária, organizacionais e políticas, com grande mérito pelos resultados alcançados. Tal como se pôde observar no capítulo anterior, a sinistralidade rodoviária tem vindo a reduzir-se ao longo do tempo, todavia, o problema não está resolvido e os acidentes e mortes continuam a atormentar as sociedades e a alimentar a incredulidade dos próprios envolvidos.

A informação produzida por estas ferramentas é recolhida na sequência da ocorrência de casos de acidentes, pelo que se acha de algum modo condicionada pelas manifestações pontuais do fenómeno. Por outro lado, apesar de todas reunirem uma grande quantidade de variáveis, nenhuma delas consegue abranger toda a dimensão do fenómeno. É algo equivalente a autopsiar um cadáver, no qual o coração já não bate e o sangue não circula. Desse modo não é já possível observar o funcionamento das interações das partes. Daí resulta a impossibilidade de observar o sistema como um todo.

Assim, as metodologias científicas tradicionais estudam o todo partido em partes, observadas separadamente, como um puzzle, sem interacção entre as peças. Esta fragilidade só poderá ser compensada por uma representação sintética do todo, construído a partir da interacção individual da população de agentes envolvidos.

Face ao concluído, emergem naturalmente algumas questões, designadamente: Que outros caminhos poderão então apontar-se para uma abordagem holística do fenómeno? Que possibilidade existe de se “autopsiar” um sistema vivo? De que modo se poderá fazer uma representação sintética do todo?

São estas as questões a que procurarei dar resposta no capítulo seguinte.

"Some problems are just too complicated for rational, logical solutions. They admite of insights, not answers." (Jerome Wiesner)

Capítulo 4

CIÊNCIAS DA COMPLEXIDADE

Para elaborar as respostas às questões formuladas no capítulo anterior vou propor uma nova abordagem científica, suportada nos conceitos de complexidade, de sistema, de modelação e de simulação computacional. Em suma, vou suportar-me nos preceitos das ciências da complexidade com vista a determinar de que modo esta nova forma de fazer ciência poderá constituir uma abordagem alternativa ao estudo do conflito rodoviário.

4.1 Conceitos de complexidade

Existem muitas concepções sobre o termo “complexidade”. Algumas evidenciam a complexidade do comportamento dos sistemas, outras a estrutura interna dos sistemas ou o seu funcionamento; outras ainda, a complexidade da sua evolução; outras ainda enfatizam a complexidade auto-organizada. Este termo pode ser encontrado em vários campos, desde os sistemas naturais, representados por sistemas biológicos, físicos e químicos; aos sistemas artificiais, tais como os sistemas computacionais e as estruturas organizacionais.

Segundo Leite (2004), a origem do termo vem dos clássicos estudos de Lotka, por volta de 1925, na sua obra *Elements of Physical Biology*. A partir dos estudos de Lotka surgiram várias publicações direccionadas ao estudo da complexidade, de entre as quais se destacam: Simon (1969), Forrester (1969), Waddington (1989) e Nicolis e Prigogine (1989), entre outros.

Para Edgar Morin (2001) a complexidade é mais uma noção lógica do que uma noção quantitativa. A complexidade aparece como irracionalidade, incerteza, confusão e desordem. Moses (2002) destaca a complexidade da estrutura interna do sistema, que está relacionada com a funcionalidade, a eficiência e a flexibilidade desse sistema.

Heylighen (1988) discorre sobre a palavra complexo recorrendo à origem da palavra latina “complexus”, que significa “enrolado”, “torcido”, junto. Daí se deduz que para existir complexidade é necessário que existam duas ou mais partes ou elementos, que as partes ou os elementos sejam conectados por várias vias e a sua separação seja difícil. Este conceito de complexidade possui uma base dual: ao mesmo tempo que apresenta partes distintas, estas são unidas pelas conexões. As partes não podem ser separadas e analisadas de forma

independente das conexões, sem as destruir. Heylighen observa ainda que, devido à diversidade de abordagens do termo complexidade, é necessário tentar classificá-la. Para tanto cria uma definição que distingue a abordagem quantitativa da qualitativa e outra que distingue a abordagem estrutural da funcional. Assim, a abordagem quantitativa reúne dados numéricos sobre os diferentes níveis da complexidade, a abordagem qualitativa avalia a influência do crescimento da informação no aumento da complexidade, a abordagem estrutural focaliza-se em subsistemas englobados por super-sistemas e a abordagem funcional centra-se nos níveis de processamento e controlo da informação.

Burgin e Simon (1997), a partir da classificação de Heylighen, acrescentam alguns elementos novos à complexidade estrutural e à complexidade funcional. Para eles a complexidade estrutural reflecte a variedade de elementos e de conexões e a complexidade funcional reflecte a variedade de funções e de comportamentos.

Casti (1994) refere-se ao termo “complexo” como sendo geralmente usado para descrever pessoas ou objectos, constituídos por muitos componentes em interacção, os quais possuem comportamentos e ou estruturas difíceis de compreender. O mesmo autor ressalta o facto de que um sistema pode ser, por um lado, estruturalmente complexo e apresentar um comportamento simples e, por outro, ter uma estrutura simples e apresentar um comportamento imprevisível. E que ainda existem sistemas, como o cérebro humano, que são complexos na estrutura e no comportamento.

Wu (2002) argumenta que o termo “complexidade” tornou-se um “chavão” que perpassa muitos campos da ciência e com vários significados. Cita a complexidade estrutural, que se refere à configuração do sistema; a complexidade funcional, que enfatiza a heterogeneidade e a não-linearidade da dinâmica do sistema; e a complexidade auto-organizada, que depende das propriedades emergentes do sistema ao co-evoluírem com o ambiente. Inicia-se por meio de interacções locais; depois, por retornos (feedbacks) em diferentes escalas espacio-temporais.

Para Axerold e Cohen (1999), “complexidade” não significa, simplesmente, muitas partes em movimento. O conceito desse termo pressupõe que o sistema consiste em partes que interagem, influenciando fortemente as probabilidades de ocorrência de eventos futuros. Stacey (1996, p.285) discute que a complexidade pode ser definida como efectiva e potencial. A efectiva está relacionada como o tamanho do esquema capaz de descrever o comportamento do sistema e torná-lo compreensível. A potencial é representada pela capacidade que os

sistemas complexos adaptativos têm para criar uma nova complexidade efectiva, a partir de uma pequena mudança no esquema. As complexidades efectiva e potencial juntas formam uma barreira de instabilidade. Os sistemas, nesse estado, operam numa fase intermediária entre a instabilidade e a estabilidade.

Morin (1977, p.105) considera que a complexidade ocorre entre a ordem e a desordem. É preciso opor e ligar essas duas tendências, pois elas são relacionais e relativas e estabelecem noções mediadoras: a ideia de interacção, que une os elementos, a ideia de transformação, que pode organizar ou dispersar os elementos; a ideia de organização, que nasce das interacções e transformações. A ligação fundamental entre essas ideias é a natureza dialógica da complexidade. A dialógica, segundo Morin, representa a simbiose de duas lógicas que, ao mesmo tempo, se alimentam, competem entre si, parasitam-se mutuamente, se opõem e se combatem. Assim, a ordem e a desordem são conceitos simultaneamente indistintos, complementares, concorrentes, antagónicos e incertos.

Na visão de Waldrop (1992), a complexidade só pode existir se tanto a ordem como a desordem estiverem presentes no sistema. Esses aspectos contraditórios devem coexistir em proporções equilibradas, de modo a não tornar o sistema perfeitamente ordenado, nem completamente desordenado, a ponto de não existir uma estrutura delimitada. Em outras palavras, o sistema deve operar à beira do caos.

Bar-Yam (1997) argumenta que a complexidade do sistema está relacionada com a quantidade de informação necessária para descrevê-la e depende do nível de detalhe requerido para a sua descrição. O autor recomenda o uso de ferramentas estatísticas e da Ciência da Computação para essa tarefa. É essencial definir o perfil da complexidade do sistema em função da escala e observação, pois considera uma escala macroscópica ou microscópica, dependendo dos objectivos do observador. Nesse sentido, Gell-Mann (1996) apresenta o conceito de granulação grosseira, que significa nível de detalhe. Ele diz que, para definir a complexidade, é sempre necessário especificar o nível de detalhe com o qual o sistema é descrito. Considera, também, que o conceito de complexidade está directamente ligado ao contexto e é subjectivo. Destaca que o observador e o equipamento utilizados para fazer a observação são fundamentais.

No seguimento de Bar-Yan e Gell-Mann, Bruce Edmonds (1999) propõe a definição de complexidade como propriedade de um modelo: *“A complexidade é a propriedade de um modelo que torna difícil ou impossível descrever todo o seu comportamento numa*

determinada linguagem, mesmo quando existe uma informação completa acerca das suas partes elementares e das suas interacções”.

Assim, poder-se-á dizer que, dos conceitos apresentados, não existe um significado homogêneo sobre o termo “complexidade”, nem uma aplicação reservada a determinada área científica. O termo é multidisciplinar e assume diferentes abordagens, de acordo com o interesse do estudo e com o grau de percepção do observador. Além disso, o termo complexidade também pode ser empregue fora do contexto das Ciências da Complexidade. Com vulgaridade se houve utilizar o termo “complexo” para caracterizar situações mais complicadas da vida quotidiana. O conceito de “complicado” será abordado mais adiante numa perspectiva sistémica.

Nas acepções citadas verifica-se que cientificamente o termo “complexidade” está intimamente associado aos sistemas. Segundo Leite (2004), a ideia de associar o conceito de sistema à complexidade foi estabelecida como resposta à insatisfação com a ciência dominante até metade do século XIX, a qual reflectia os preceitos do reducionismo. Assim, houve a percepção de que, para compreender e intervir em fenómenos com características complexas, é necessário associar o conceito de complexidade ao conceito de sistema (Morin e Le Moigne, 1977).

4.2 Conceito de sistema

Segundo Leite (2004), apesar do intenso uso do termo sistema, os conceitos a ele atribuídos derivavam, na sua maioria, da ideia de conjuntos matemáticos, o que limitava a magnitude da sua actuação. Le Moigne (1977) ressalta que poderia citar mais de cem definições diferentes da palavra “sistema” começadas pela frase: “Um sistema é um conjunto de...” definição tida como legítima por muito tempo, como suporte de um representativo número de desenvolvimentos em análise de sistemas. Leibniz, em 1666, citado por Morin (1977) descreve um sistema como um conjunto de partes. Nesse sentido, este autor destaca a definição que sobreviveu dos meados do século XVII até a primeira metade do século XX, com o surgimento dos sistemistas: “Um sistema é uma inter-relação de elementos constituindo uma entidade ou uma unidade global.” A definição avança por reflectir a ideia de globalidade e a ideia relacional.

Ainda segundo Leite (2004), Morin (1977) argumenta que foi com a definição de Ferdinand de Saussure, em 1931, que o conceito de sistema adquiriu a ideia de sistemismo, pois associou os conceitos de organização, totalidade e inter-relação ao conceito de sistema. Até então a

organização era um conceito ausente na maioria das definições de sistemas, sendo ressaltados ora o conceito de totalidade, ora de inter-relação, ora os dois. Assim, Morin concebe o conceito de sistema, incorporando nele a visão sistémica dos objectos: “ Um sistema é uma unidade global organizada por inter-relações entre elementos, acções e indivíduos” Morin (1977,p.132). Um sistema é uma representação de um recorte da realidade, que pode ser analisado como totalidade organizada, com um funcionamento característico (Garcia, 2002). Burke (2000) apresenta o conceito de sistema como um todo complexo; uma entidade integrada de componentes heterogéneos que agem de forma coordenada.

Assim, pode considerar-se existirem vários tipos de sistemas.

4.2.1 Tipos de sistemas

Observa-se que há uma grande quantidade de denominações que varia conforme a área que utiliza o termo sistema. Na Física: sistemas lineares, determinísticos, caóticos, estocásticos. Na Química: sistemas dissipativos. Na Astronomia: sistemas evolutivos. Na Cibernética: sistemas especialistas e artificiais. Na Biologia: sistemas vivos e auto-organizados. Estes são exemplos de designações específicas de cada área da ciência, as quais interpretam o conceito de acordo com objectivos próprios e aplicam-lhe uma denominação condizente. Contudo, não há uma clara preocupação em distinguir um sistema simples de um complexo. A esse respeito, Bar-Yam (1997) argumenta que a denominação dada ao sistema, pelos diferentes campos de estudo, está mais relacionada com o tipo de questão que trata do que aos sistemas estudados e ao tipo de análise empregue.

Basicamente, existem dois tipos de sistemas: os “*sistemas complicados*” e os “*sistemas complexos*”. Os primeiros são formados por partes que podem estar desconectadas do todo, uma das quais pode representar o todo, com comportamento previsível. Já os sistemas complexos são formados por partes em conexão com o todo. Da interacção entre as partes e o todo emergem comportamentos imprevisíveis, facto que impossibilita uma parte de representar o todo.

4.2.1.1 Sistemas complicados

A denominação de sistema complicado está associada à visão do paradigma reducionista. Iniciado com a ciência clássica, continuou com Descartes, no século XVII, e dominou a ciência até o início do século XX. Essa percepção reduz os fenómenos ao próprio desempenho das partes, desconsiderando as conexões entre elas (Leite, 2004).

Assim, os sistemas complicados são constituídos por redes complicadas, ligando elementos identificáveis, com comportamentos enumeráveis e pouco numerosos (Le Moigne, 1977). Snowden (2003) considera que um sistema complicado é composto de inúmeros componentes, podendo ser identificáveis e definidos, as relações entre os quais, também, podendo ser identificadas e definidas. Dessa forma, as causas e os efeitos podem ser separados, compreendendo as suas ligações e sendo possível controlar os resultados. O sistema pode ser melhorado pela optimização das partes, uma vez que o todo não é mais nem menos que a soma delas. Um sistema complicado é formado de muitas partes ou elementos que se comportam dentro de um padrão periódico regular (Heylighen, 1988).

4.2.1.2 Sistemas complexos

Durante o século XX, um número considerável de descobertas questionou os pressupostos do método reducionista. Foster, Kay e Roe (2001) argumentam que, na Física, a mecânica quântica demonstrou que, no nível micro, a previsibilidade e o perfeito conhecimento dos fenómenos são impossíveis de serem atingidos. Já no nível macro, a Ecologia e a Cibernética revelaram as limitações do tratamento dos sistemas complexos de forma linear (Leite, 2004).

Os sistemas complexos, ao contrário dos complicados, possuem, como principais peculiaridades, inter-conexão e entrelaçamento. Eles não existem em partes independentes. Dessas observações, inicia-se uma efectiva busca de características que identifiquem a complexidade de um sistema.

Porém, dentro dos sistemas complexos existe ainda um outro tipo de sistema, o sistema complexo adaptativo.

4.2.1.3 Sistemas complexos adaptativos

Há também a considerar os *Sistemas Complexos Adaptativos*, os quais são capazes de mudar para se adaptarem às mudanças do ambiente. Eles podem também mudar o ambiente para o adaptar a eles (Gell.Mann, 1996).

Gell-Mann (1996) define os sistemas complexos adaptativos como aqueles que aprendem ou evoluem da mesma maneira como os sistemas vivos. São compostos de agentes que se adaptam, mudando as próprias regras internas a partir de experiências acumuladas. (Holland, 1995; Stacey, 1996; Axelrod e Cohen, 2000). Para Wu (2002), um sistema complexo adaptativo é um sistema composto de conjuntos heterogêneos de tipos, nos quais a estrutura e o funcionamento emergem do equilíbrio entre a constante produção de diversidade, devido a várias forças, e a redução da diversidade por meio de um processo de selecção, mediado pelas

interacções locais. Gell-Mann observa que uma característica comum a todos os sistemas complexos adaptativos, embora possam ser muito diferentes nas suas propriedades físicas, é de que eles adquirem informações sobre o ambiente e a própria interacção com o ambiente, identificando regularidades nas informações captadas, condensando-as num esquema e agindo no mundo real a partir desse esquema. Em cada situação, no entanto, há vários esquemas competindo, e os resultados da acção sobre o mundo real retro-alimentam o esquema e influenciam a competição entre eles. Esses sistemas apresentam uma tendência geral para gerar outros sistemas análogos. Isto acontece pela evolução em escalas diferentes, pela aprendizagem e pela interconexão dos fenómenos. Como exemplo, Gell-Mann (1996) cita a sequência de evoluções ocorridas a partir da evolução química pré-biótica, a qual conduziu a evolução biológica, que, por sua vez, possibilitou o surgimento do sistema imunológico dos mamíferos associado à aprendizagem individual. A partir destes, à evolução cultural humana e à evolução cultural em outras espécies e, daí, à evolução das sociedades e organizações.

"Perspectivas decorrentes do estudo de sistemas adaptativos complexos têm sido usadas para repensar e redesenhar empresas, indústria e organizações governamentais e sistemas para que sejam mais flexíveis, adaptáveis e capazes de responder rapidamente e de forma mais eficaz às mudanças no ambiente. Os Sistemas Adaptativos Complexos são caracterizados por organizações distribuídas ou por redes, cujas partes exercem influência recíproca, quer directa, quer indirectamente, através de ciclos de retorno (feedback loops), as quais evoluem e se adaptam continuamente para realizar grandes objectivos. "(Sanders, 2003; Sanders e Kadtke, 2001).

4.2.2 Características dos sistemas complexos

Casti (1994) sugere que, para se lidar com sistemas complexos, se inicie por apresentar características que o diferenciem dos sistemas simples. Ele denomina essas características como “impressões digitais” da complexidade.

- **Quantidade e heterogeneidade** - Na visão de Heylighen (1998), um sistema complexo possui duas ou mais partes ou elementos diferentes, as quais são conectadas ou entrelaçadas e que interagem não-linearmente. Os componentes do sistema, normalmente, interagem entre si de modo não linear, recorrendo a retornos “loops de feedbacks” entre eles (Wu, 2002).

- **Variedade e variabilidade** - O grande número de estados que podem ser assumidos pelas unidades do sistema é a maior dificuldade para representar os sistemas complexos. Nesse aspecto, destacam-se: a variedade e a variabilidade. A variedade ocorre quando a unidade

pode ser predisposta para produzir várias quantidades do mesmo resultado. A variabilidade existe quando as unidades de produção são predispostas no sentido de produzir vários tipos de resultados. Os sistemas, ao assumirem várias configurações, apresentam dificuldade de representação, tornando-se um grande problema para a gestão dos sistemas complexos (Gino, 2002).

- **Interdependência** - Para compreender o comportamento do sistema complexo é necessário entender não somente o comportamento das suas partes mas também como elas agem juntas para formar o comportamento do todo (Bar-Yam, 1997), (Gino, 2002) e (Baranger, 1999).

- **Imprevisibilidade** - O comportamento de sistemas complexos é imprevisível, devido à interação entre as partes e mais imprevisível quando interage com outros sistemas (Heylighen, 1998)

- **Evolução** - Os sistemas complexos quando evoluem são imprevisíveis. A evolução dos sistemas não pode ser guiada (Heylighen, 1998).

- **Instabilidade** - Os sistemas complexos tendem a possuir muitos modos possíveis de comportamento; as mudanças entre esses modos são, frequentemente, resultados de pequenas mudanças em alguns factores que controlam o sistema (Casti, 1994).

- **Incerteza** - Todo sistema responde a condições externas, tendo como base o seu próprio estado. Nos sistemas complexos, nem sempre essas condições, para as quais o sistema dará respostas e o seu próprio estado, são previsíveis. Como consequência, um sistema complexo é caracterizado por um grande número de interdependências, várias configurações possíveis e dificuldade de reconhecer, quais destas são preferíveis para determinada situação (Gino, 2002).

- **Adaptabilidade** - Os sistemas complexos tendem a ser compostos de muitos agentes inteligentes, que tomam decisões e agem com base em informações parciais sobre o sistema inteiro. Mas esses agentes são capazes de mudar as próprias regras de decisões, com base nas informações adquiridas (Casti, 1994).

- **Organização e Auto-organização** - A organização é um encadeamento de relações entre componentes e indivíduos que produzem um sistema complexo, dotando-o de qualidades desconhecidas quanto aos componentes ou indivíduos. A auto-organização confere estabilidade às relações, possibilitando uma certa duração ao sistema, apesar das perturbações aleatórias (Morin, 1977).

- **Irreducibilidade** - Os sistemas complexos resultam num todo unificado. Eles não podem ser compreendidos nem pela desintegração das partes que os compõem, nem pela análise de suas partes isoladas. O comportamento do sistema é determinado pela interação entre as partes e qualquer desintegração do sistema destrói muitos aspectos da sua individualidade (Casti, 1994).

- **Emergência** - Considerada a importância da “Emergência”, em sistemas complexos, reserva-se para esta característica uma secção própria, com o fim de a abordar com maior profundidade.

4.2.2.1 A Emergência

Os sistemas complexos produzem padrões comportamentais e propriedades que não podem ser previstos pelo conhecimento das suas partes isoladas. As propriedades emergentes são as mais evidentes características que distinguem um sistema complexo de um sistema complicado (Casti, 1994).

Segundo Morin (1977), as emergências são as qualidades ou propriedades de um sistema que apresentam um carácter de novidade com relação às qualidades ou propriedades dos componentes isolados ou dispostos diferentemente em um outro tipo de sistema. A emergência apresenta três pressupostos:

- *O todo é mais do que a soma das partes*: o sistema possui algo mais do que seus componentes considerados de modo isolado – a sua organização, a própria unidade global, as qualidades e propriedades novas que emergem da organização e da unidade global. Esses três termos são entrelaçados e difíceis de separar. Morin (1977) destaca as emergências globais, ressaltando que todo o estado global apresenta qualidades emergentes. A realidade da emergência comporta a ideia de qualidade, produto, globalidade e novidade. Tais ideias precisam de estar interligadas para se compreender a emergência. A emergência da realidade é logicamente imprevisível e fisicamente irreducível. Elas perdem-se se o sistema se dissocia.

- *O todo é menos do que a soma das partes*: toda a organização comporta diversos níveis de subordinação quanto aos componentes. Em todo sistema, há coesões sobre as partes. Estas

impõem restrições e servidões, que fazem perder ou inibir qualidades e propriedades. Nesse sentido, o todo é, portanto, menos do que a soma das partes. Deve-se considerar, no sistema, não somente o ganho de emergências, mas também a perda, por imposições, repressões e subordinações. Um sistema não é apenas enriquecimento, é, também, empobrecimento. Por isso, é essencial observar em que proporções existem enriquecimento e empobrecimento.

- *A formação do todo e as transformações das partes*: um sistema é um todo que toma forma ao mesmo tempo em que seus elementos se transformam. A ideia de emergência é inseparável da ideia de criação de uma forma nova que constitui um todo. A organização transforma uma diversidade descontínua de elementos em uma forma global. Por fim, a emergência da emergência faz surgir a globalidade.

A emergência é exemplificada por Baranger (1999) da seguinte forma: o corpo humano é capaz de caminhar. Esta é uma propriedade emergente. Contudo, estudando-se somente a cabeça, somente o tronco ou somente os membros de uma pessoa, não haverá a compreensão da capacidade de caminhar.

A partir da constatação da coexistência de tipos diferentes de sistemas e do reconhecimento de que os sistemas complexos possuem características peculiares que os diferenciam dos sistemas complicados, percebeu-se a inadequação da aplicação da abordagem reducionista aos sistemas complexos. Assim, iniciou-se um processo de formulação de várias teorias que se adequassem às características desses sistemas. Desse modo, surgiu o termo “Ciências da Complexidade”, que é discutido seguidamente.

4.3 Ciências da complexidade

As Ciências da Complexidade dividem-se em muitos ramos, os quais tiveram o seu desenvolvimento associado, na maioria, a um campo específico da ciência e a objectivos diferenciados. Podem-se destacar: a Cibernética, a Teoria Geral de Sistemas, os Sistemas Dinâmicos, a Teoria do Caos e a Teoria da Complexidade. Todos esses ramos têm como objectivo comum compreender a complexidade existente nos sistemas. No nosso caso interessa-nos abordar, com maior profundidade, a Teoria da Complexidade.

4.3.1 A teoria da complexidade

A Teoria da Complexidade é, normalmente, abordada na literatura como sinónimo de Ciências da Complexidade, isso acontece em decorrência da maior abrangência que a Teoria da Complexidade assume em relação às outras teorias componentes das Ciências da Complexidade. Segundo Abraham (2002), a Teoria da Complexidade foi concebida a partir

das conexões entre a teoria geral de sistemas, a cibernética e a teoria dos sistemas dinâmicos (Leite, 2004).

Segundo Leite (2004), Higgs (2001) destaca que a Teoria da Complexidade trata com as entidades ou com os componentes do sistema que interagem e se mudam a si próprios de modo imprevisível. O autor argumenta que, dessa forma, existem dois níveis em que os sistemas podem ser analisados: as interações ou conectividades das entidades ou componentes e a variabilidade das próprias entidades. Pigliucci (2000), confirmando a percepção de Higgs, estabelece que, essencialmente, a Teoria da Complexidade tenta estudar sistemas que satisfaçam duas condições: (1) sejam constituídos de muitas partes em interação; (2) as interações resultem em propriedades emergentes, que não possam ser reduzidas à simples soma das propriedades dos componentes individuais. A combinação da estrutura e da emergência leva à auto-organização, que ocorre quando um comportamento emergente produz mudança na estrutura existente ou cria uma nova estrutura. Nesse sentido, Warren, Franklin e Streeter (1998) observam que, enquanto a Teoria Geral de Sistemas intervém nos sistemas, considerando o holismo, a Teoria da Complexidade focaliza o modo pelo qual as interações locais dos componentes individuais levam a um sistema global. Preocupa-se, ainda, com as configurações assumidas pelas interações e o modo como agem para manter e aumentar a complexidade do sistema. Em outras palavras, a Teoria da Complexidade interessa-se pela evolução dos sistemas complexos. Como apresentam muitos outros autores, a Teoria da Complexidade, por meio da análise das interações e das propriedades emergentes, propõe-se trabalhar especificamente na faixa entre a ordem e a desordem.

A metodologia e a instrumentação utilizada pela Teoria da Complexidade para a observação e experimentação de sistemas complexos são, genericamente, a modelação e a simulação computacional.

4.3.2 Metodologia utilizada pela teoria da complexidade

Para tornar a explicação da metodologia utilizada pela teoria da complexidade mais simples e atractiva vou recorrer ao modelo de síntese proposto por Schilperoord (2004), que o mesmo designou de *Previsão em Complexidade* “Complexity in Foresight”. Este modelo visa representar a metodologia seguida na investigação em ciências da complexidade, que se desenvolve em três fases: a *conceptualização da complexidade*, domínio específico desta

ciência “Science Business”; a *experimentação* “Laboratories & Projects”; e a *previsão* “Foresight”.

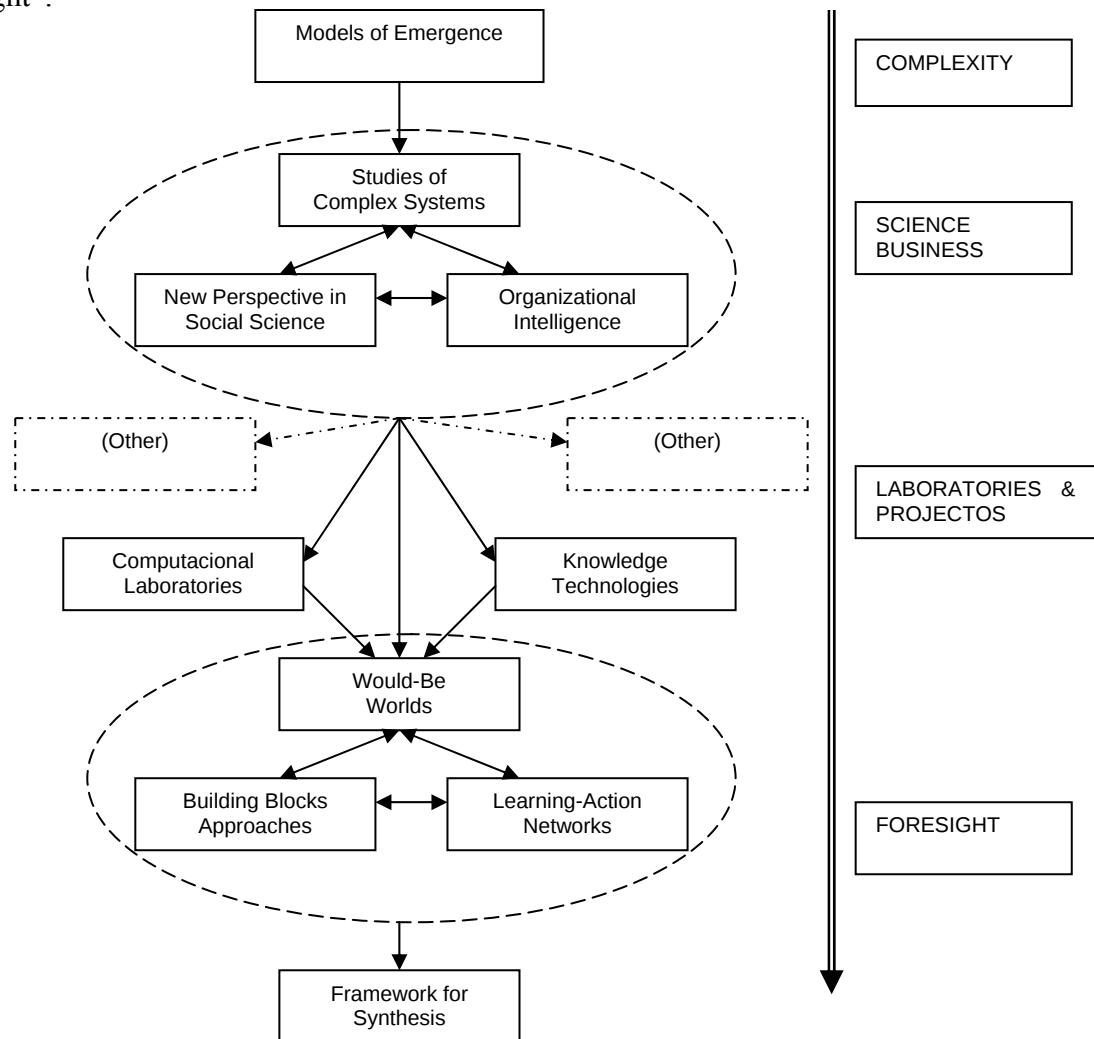


Figura 4.1 – Modelo de síntese para a previsão em complexidade. (Schilperoord, 2004)

Numa breve descrição, o modelo de Schilperoord, a primeira fase, da *conceptualização da complexidade*, desenvolve-se a partir de *modelos de emergência* “models of Emergence”, os quais se suportam nos *estudos de sistemas complexos* “Studies of Complex Systems”, numa *nova perspectiva em ciências sociais* “New Perspective in Social Sciences” e na *inteligência organizacional* “Organizational Intelligence”. A segunda fase, da *experimentação*, é o resultado da combinação de *laboratórios computacionais* “Computational Laboratories” com as *tecnologias de conhecimento* “Knowledge Technologies”. Por fim, a *experimentação* suporta-se na construção de *mundos artificiais* “Would-Be Worlds”, na *construção de blocos de informação* “Building Blocks Approaches” e em *redes de aprendizagem activa* “Learning-Action Networks”, de que em suma resulta a *previsão (perdição)* sobre os fenómenos em

sistemas complexos, que o autor designou como *ferramenta para a síntese* “Framework for Synthesis”.

O conteúdo experimental deste modelo foi desenvolvido para aplicação numa Simulação Multi-Agente destinada a criar uma base de trabalho para planeamento estratégico organizacional. Embora o objectivo deste modelo se dirija a fins diversos do pretendido neste trabalho, destina-se a tratar um sistema tão complexo quanto o das relações humanas, comerciais e empresariais. Daí que, no meu ponto de vista, este modelo pode ser aplicado por analogia ao problema da sinistralidade rodoviária em estudo neste trabalho. Matéria de que vou tratar seguidamente, aprofundando a fases de investigação propostas por este modelo, com excepção da conceptualização da complexidade, que profusamente tratada nas secções anteriores.

4.3.2.1 Nova abordagem científica

A surpresa que representa a figura 4.1 para além de resultar do engenho humano, resulta da pesquisa permanente de novas formas de tentar explicar a incompreensibilidade do real. Esta é uma nova forma de abordagem científica de problemas complexos. Esta nova metodologia foi desenvolvida por Kauffman (1993), do Instituto de Santa Fé (ISF), nas suas pesquisas sobre a evolução biológica e tecnológica.

Um dos preceitos da investigação da complexidade, estabelecidos no Instituto de Santa Fé (ISF), em meados da década de 1980, consiste na investigação multidisciplinar, envolvendo ciências de vários ramos, o que se considera uma abordagem científica pioneira.

Os pioneiros de Santa Fé preocuparam-se com uma série de questões, pouco convencionais, sobre todos os tipos de sistemas complexos conhecidos em matemática, física, biologia, psicologia, economia, sociologia e outras disciplinas. As suas questões tinham em comum o facto de todas se referirem às propriedades emergentes dos sistemas complexos. O que os levou a especular sobre a dominância de longa data da ciência reducionista e do enorme impacto que esta teve na organização, nos métodos e nas ferramentas científicas. Eles acreditavam que a ciência reducionista não era plenamente capaz de enfrentar algumas questões cruciais.

Esta nova forma de fazer ciência começa por questionar o uso sistemático de abordagens reducionistas que, resumidamente, consiste na divisão de um problema nas suas partes constituintes, pelo que, quando se lida com realidades complexas, poderemos não compreender o problema no seu todo, mesmo que se conheçam bem as suas partes e as suas

interacções. Por conseguinte, um importante aspecto da investigação em complexidade é a concepção e experimentação de alternativas para fazer face a esses constrangimentos.

Com efeito, facilmente se observam os limites do pensamento reducionista; se os comportamentos emergentes e os fenómenos emergentes são o resultado de um verdadeiro processo de mudança “de baixo para cima” (bottom-up), estes não podem ser explicados exclusivamente em termos do comportamento individual dos agentes. Por outras palavras, eles não podem ser reduzidos aos comportamentos dos agentes. Todavia, os instrumentos da ciência reducionista permitem-nos rastrear e explicar a maior parte de tais comportamentos, mas quase sempre produzem apenas explicações parciais. Em todo o caso, as explicações reducionistas também podem ser muito poderosas, os padrões de comportamentos precisam de ser identificados, de modo a que uma compreensão mais holística dos fenómenos possa ser alcançada.

4.3.2.2 Modelos de emergência – (Models of emergence)

Os modelos de emergência podem ajudar a identificar as propriedades ou comportamentos de sistemas que não possam ser reduzidos às suas partes constituintes; ou seja, aqueles em que o todo é mais que a soma das partes; aqueles que emergem a partir de padrões aparentemente aleatórios.

Uma característica marcante destes modelos é que, quando o modelador/experimentador dota os agentes com pequenos conjuntos de regras simples, de propriedades e comportamentos, o comportamento agregado consequente pode emergir longe da simplicidade e ser surpreendentemente realista.

Outra característica dos modelos de emergência é a sua capacidade de permitir uma maneira observação dos sistemas “de-baixo-para-cima” (bottom-up). Isto significa que eles permitem-nos observar, numa escala macroscópica, as propriedades e os comportamentos do sistema, que podem emergir de baixo para cima (bottom-up), a partir da interacção de muitos agentes, que funcionam pela obediência a um conjunto de regras comportamentais simples, introduzidas numa escala local, microscópica. Particularmente inspiradores são os modelos de emergência utilizados em vida artificial (Alife-models), um campo de pesquisa da complexidade que se concentra nos sistemas vivos.

4.3.2.3 Modelos de vida artificial

Ilustrativos de “Alife-models” são, por exemplo, os modelos de colónias de formigas, que demonstram convincentemente o processo próprio de uma colónia se alimentar, podendo

perceber-se como o resultado emergente de uma multiplicidade de agentes (formigas) obedecendo a algumas regras básicas (que envolve, inclusivamente, a marcação de trilhos de feromônas). Segundo Schilperoord, os “Alife-models” são modelos inspiradores pelo facto de poderem ter uso prático, como é o caso da British Telecom que, por analogia com modelo da colónia de formigas, desenvolveu o seu modelo de encaminhamento de chamadas de rede (uma chamada bem sucedida deixa uma marca equivalente às feromônas das formigas para encaminhar futuras chamadas). Outras experiências, pela sua importância, serão citadas mais adiante.

4.3.2.4 Estudo de sistemas complexos – (Studies of complex systems)

As propriedades emergentes são propriedades de grande escala ou noutro sentido efeitos “globais” que resultam de um elevado número de agentes em interacção, que funcionam de forma independente e obedecem a regras locais simples. Por exemplo, de acordo com esse ponto de vista, a liquidez da água é uma propriedade emergente da interacção das moléculas da água. Analogamente, a mente é uma propriedade emergente da interacção dos neurónios. (Axelrod, 1997).

Segundo Schilperoord, a questão central que é muitas vezes colocada na investigação da complexidade é a seguinte: Como surge a emergência? No seguimento do exemplo anterior: Como é que a água se converte em gelo quando arrefece? Como aprende a mente a partir da experiência? É em busca de respostas mais convincentes a estas questões que a pesquisa da complexidade visa ultrapassar o poder explicativo do pensamento linear reducionista.

4.3.2.5 Novas perspectiva em ciências sociais – (New perspectives in social science)

“O processo social considera-se complexo quando não é fácil decompô-lo em sub-processos separados: económicos, demográficos, culturais, espaciais, e cujas análises isoladas possam ser agregadas para fornecer uma adequada análise do processo social como um todo”. (Axtell e Epstein, 1996)

A aplicação prática da complexidade aos problemas sociais consiste em lidar com agentes pró-activos de sistemas sociais e organizacionais e, por vezes, é muito difícil identificar as regras escritas e não escritas pelas quais esses agentes operam. As simulações experimentais podem ajudar a identificar essas regras.

Por isso, a complexidade na área das ciências sociais, actualmente, envolve a aplicação de uma variedade de abordagens de modelação computacional. São disso exemplo uma série de experiências paradigmáticas que seguidamente se descrevem.

- Modelo “Sugarscape”

Numa série de experiências simuladas com uma sociedade artificial chamada “Sugarscape”, Epstein e Axtell conseguiram demonstrar de que modo os fenómenos sócio-culturais tais como: as trocas comerciais, a riqueza e a guerra surgem naturalmente a partir de simples acções individuais. As sociedades artificiais são mundos virtuais que permitem aos agentes desencadear acções tais como combater, revelar características culturais, procriar, transmitir doenças, etc. Na Sugarscape os agentes vivem num cenário que lhes fornece o açúcar de que precisam para sobreviver. É claro que o cenário e o açúcar servem apenas como um ambiente de que facilmente se apropriam para as suas interacções sociais ou anti-sociais.

A abordagem de Epstein e Axtell utilizou o Sugarscape como um laboratório de teste de hipóteses de experimentação controlada. Para cada fenómeno sócio-cultural que investigaram utilizaram aproximadamente o mesmo tipo de hipóteses, isto é, eles assumiram que as regras locais de comportamentos individuais podem ser suficientes para gerar o fenómeno sob investigação.

- Modelo da evolução da cooperação

Nas suas experiências, Axelrod (1997), realizou uma modelação que permitiu aos agentes comportarem-se de modo a que o resultado agregado exibisse processos de adaptação (inspirado pelo trabalho de Holland com Sistemas Complexos Adaptativos e Algoritmos Genéticos) e apresentou resultados significativos com simples modelos de Simulação Social Baseada em agentes. Como exemplo, numa das suas experiências, a “Evolução do Dilema do Prisioneiro”, ele incorporou um mecanismo de aprendizagem individual (implementado com algoritmos genéticos) que permitiu aos agentes desenvolverem as suas estratégias com base na experimentação prévia.

A versão mais simples deste jogo, “O Dilema do Prisioneiro”, representa a possibilidade que dois prisioneiros têm de cooperarem ou de se denunciarem. Ambos desconhecem a intenção do outro. Sabendo que a denuncia tem um retorno maior do que a cooperação. Porém, se ambos denunciarem perderão mais do que se tivessem cooperado. Da análise repetida deste jogo teórico, observou-se que ambos os prisioneiros tendem a denunciar-se.

Este simples jogo tem provado ser um poderoso meio para analisar o conflito individual e a racionalidade grupal. Assim, conclui-se que num grupo cujos membros optam por racionalizar o auto-interesse acabam por perder mais do que um grupo cujos membros racionalizam o interesse colectivo. Deste modo, o êxito será maior se todos os membros

optarem pelo interesse colectivo, em detrimento do individual. Este jogo tem atraído a atenção em uma ampla variedade de disciplinas e continua a provocar novas maneiras de pensar sobre o egoísmo humano, a concorrência e a colaboração, a confiança e a racionalidade. Este jogo tem sido também analisado no âmbito das aplicações possíveis para efeitos de estratégias nucleares.

- Echo e o estudo de sistemas complexos adaptativos

Holland (1995) desenvolveu um raciocínio experimental acerca dos Sistemas complexos adaptativos utilizando um modelo de vida artificial chamado Echo. Em termos simples, Echo é um mundo virtual que permite a uma população de agentes evoluírem para sistemas possuidores de características semelhantes aos sistemas ecológicos incluídos em comunidades de organismos vivos: eles desenvolvem-se, adaptam-se, reúnem-se, competem, cooperam e ao realizar tudo isto criam ainda maior diversidade e novidade. Os resultados das suas experiências com o Echo provaram que os sistemas adaptativos complexos conseguem simular comportamentos fascinantes de forma espontânea, isto é, sem planeamento central.

- Modelo de segregação de Schelling

Em 1971 Schelling publicou um bem conhecido raciocínio experimental que ilustra como a Simulação Multi-Agente (SMA) pode ajudar-nos a compreender determinados fenómenos sociais.

A segregação étnica dentro de determinados bairros, geograficamente distintos, é frequentemente considerada como o resultado da discriminação ou das dificuldades económicas. A dúvida inicial de Schelling foi: suponha que as famílias têm apenas uma leve preferência para viverem em bairros em que o seu grupo étnico é maioritário: será isto suficiente para que a segregação étnica ocorra? Fazendo a experiência com agentes do tipo Autómatos Celulares, Schelling concluiu que se as famílias, quer negras, quer brancas preferissem viver em bairros nos quais o seu próprio grupo étnico fosse maioritário e elas fossem capazes de se deslocar para o local mais próximo, que satisfizesse os seus desejos, a segregação completa surgiria inevitavelmente.

As ciências sociais parecem cada vez mais dispostas e preparadas para ultrapassar a prevalência da “incerteza” e do “indeterminismo” nas suas investigações. (Schilperoord, 2004).

- A **Incerteza** é a parte que resulta de uma investigação que não pode ser removida pela adição de mais conhecimento ou de mais informação. As incertezas deste tipo tendem a surgir

em estudos concebidos para resolver questões que dizem respeito ao “feedback” contínuo da interacção em sistemas complexos, ou seja, os agentes mudam o sistema ao mesmo tempo que são mudados pelo mesmo sistema, o que se designa por "Reflexibilidade". Num mundo cada vez mais interligado, a incerteza torna-se cada vez mais frequente, como por exemplo nos estudos das alterações climáticas.

- O **Indeterminismo**. Pelos mesmos motivos, cada vez mais os estudos são também afectados pela indeterminação, especialmente se o seu foco estratégico é a interacção em contextos sociais.

Por conseguinte, será apenas uma questão de tempo até que as ciências sociais considerem as ferramentas computacionais (algoritmos de simulação de modelos) como metodologias complementares ou alternativas aos instrumentos tradicionais.

4.3.2.6 Inteligência organizacional – (Organizational intelligence)

A inteligência organizacional é uma forma de pensamento que se expande na ideia de que as “organizações inteligentes” possuem um elevado coeficiente de inteligência, sendo este um indicador sobre a sua eficácia na aquisição e utilização do conhecimento. É amplamente reconhecido de que a ideia acerca da "Aprendizagem nas Organizações” conectada à cibernética pode produzir informações valiosas para os gestores (decisores) de organizações ligadas à resolução de problemas complexos. A proposta da inteligência organizacional aplicada a organizações, como sistemas complexos adaptativos, optimiza a sua “performance cognitiva global” para que possam adaptar-se mais fácil e rapidamente às mutações do ambiente. A cibernética aplicada ao estudo do fenómeno da sinistralidade pode aumentar o conhecimento sobre o problema e melhorar as performances das medidas a tomar pelas entidades envolvidas no seu controlo.

4.3.2.7 Experimentação – “Laboratories & Projects”

A experimentação científica e de projectos, nesta nova forma de fazer ciência, suporta-se em dois meios distintos, que se poderão designar como o “Hardware” e o “Software” da experimentação, ou seja, os laboratórios computacionais e as tecnologias do conhecimento, respectivamente.

4.3.2.8 Laboratórios computacionais – (Computational laboratories)

Os laboratórios computacionais são ferramentas que permitem o estudo do comportamento de sistemas complexos através de experiências controlados e replicáveis. Estes são considerados

meios importantes de aplicação prática à teoria dos sistemas complexos.

4.3.2.9 Tecnologias de conhecimento – (Knowledge technologies)

As tecnologias do conhecimento, a par das tecnologias de informação, destinam-se a produzir conhecimento. Estas ferramentas podem ser utilizadas para a modelação e representação sintética de sistemas com o fim de os estudar e produzir conhecimento novo sobre eles. Existem vários tipos de “ferramentas” que podem ser utilizadas para representar e analisar os sistemas complexos, designadamente, “Autómatos Celulares”, “Redes Neurais”, “Algoritmos Genéticos” e “Simulação Multi-Agente.

As tecnologias do conhecimento podem revelar-se muito importantes para o funcionamento inteligente das organizações. Estas tecnologias do conhecimento resultam de uma expansão do domínio das tecnologias da informação, bem conhecido pelos serviços partilhados, ou seja, agrupamentos de serviços, de empresas e de comunidades que podem ser ligados em rede, como por exemplo a Internet (World Wide Web - www).

4.3.2.10 Previsão (Predição) – “Foresihtgt”

“A previsão pode ser definida como um processo sistemático e participado de recolha de conhecimento e de produção de visões de médio a longo prazo, assente na realidade actual, e destinado a mobilizar e a decidir acções futuras” (European Commission Foresight Book).

Este é o objectivo final da ciência, ou seja, obter predições sobre os fenómenos de modo a permitir acções antecipadas aos acontecimentos. No caso concreto da sinistralidade rodoviária, esta é a mais-valia de que todos os gestores e decisores necessitam para prevenir a ocorrência do fenómeno.

No modelo apresentado, a previsão resulta da construção de mundos virtuais, da construção de blocos de informação e das redes de aprendizagem activa.

4.3.2.11 Mundos virtuais – (Would-be worlds)

Este é um dos instrumentos necessários para a análise projectiva em Ciências da Complexidade, através da criação de mundos e de cenários virtuais em laboratórios computacionais. Os “mundos virtuais” consistem em modelos de simulação computacional que funcionam como laboratórios para a realização de experiências sobre o mundo real (Casti, 1997). Existe um amplo leque de modelos de simulações computacionais. Um dos mais importantes modelos consiste na micro-simulação pelo facto de permitir operar grandes quantidades de dados empíricos, como por exemplo a micro-simulação do tráfego rodoviário

de áreas metropolitanas. Um outro modelo de simulação, para efeitos educativos, prende-se com os jogos de computador, como por exemplo “O SimCity”.

Poderão também simular-se “cenários virtuais”. Além das micro-simulações e dos jogos é também possível construir cenários a partir de realidades fictícias. A sua potencial utilidade prende-se com o apoio à decisão a partir de intuições geradas pela simulação.

4.3.2.12 Construção de blocos de informação – (Building blocks approaches)

A construção de blocos, fundamental em sistemas adaptativos complexos, consiste em representar as capacidades adaptativas dos agente através do desenvolvimento de blocos de informação pré-programados que permitam lidar com diversos objectivos de pesquisa (Simon, 1996; Holland, 1995). Um conjunto modesto de blocos torna possível conceber uma série de opções. Tome-se como exemplo o jogo de LEGOS. Embora este seja um excelente método em termos de flexibilidade, a dificuldade consiste em descobrir a forma correcta de construção dos blocos e o modo de os combinar face a pesquisas específicas.

A construção de blocos pode ser desenvolvida através das tecnologias do conhecimento. Como exemplo demonstrativo considere-se a “Programação por Orientação de Objectos” (POO), método de programação da linguagem JAVA, a qual possui bibliotecas de blocos pré-programados (organizados e sintetizados) de pedaços de conhecimento complexo, que posteriormente podem ser utilizados e combinados com outros blocos, na sequência da programação de quaisquer algoritmos.

4.3.2.13 Redes de aprendizagem activa – “Learning-action networks (LANs)”

As redes de aprendizagem activa constituem-se em séries de elos informais que cobrem e complementam as estruturas organizacionais formais e unem os indivíduos pelo fluxo de conhecimento, informação e ideias. Estas redes foram identificadas para a obtenção de desenvolvimentos sustentados das organizações (Clarke e Roome, 1999).

O conceito de LANs consiste numa forma de pensar a inteligência organizacional a partir do modelo de interligação social da acção individual dos agentes de uma comunidade. Estas redes, no que concerne ao sistema rodoviário, podem ser entendidas como o mecanismo de difusão, partilha e construção da cultura rodoviária. Uma cultura rodoviária mais agressiva ou mais altruísta consolida-se também pela rede de interacções sociais.

Explicado o modelo de Previsão em Complexidade Schilperoord, chegou o momento de abordar os conceitos de simulação e de modelação, a partir dos quais resulta a forma de todo o processo.

4.3.3 Simulação social baseada em agentes (SSBA)

A SSBA representa uma novidade de pesquisa em ciências sociais porque oferece a possibilidade de utilizar populações de agentes artificiais em experiências que podem ser múltiplas vezes repetidas em circunstâncias exactamente iguais, o que é impossível de conseguir com pessoas e organizações reais.

A tecnologia de suporte da SSBA oferece aos investigadores uma grande liberdade e flexibilidade de experimentações a realizar com os agentes. Hoje é possível realizar experiências com agentes individuais muito sofisticados, baseados em inteligência artificial, que permitem aos agentes realizar coisas como: perceber, raciocinar, decidir, comunicar, ser social, ter emoções, observar e outros comportamentos humanos semelhantes.

A Simulação Social Baseada em Agentes (SSBA) é, usualmente, designada como uma nova abordagem “*bottom-up*” das ciências sociais, em contraste com a sua abordagem tradicional “*top-down*”. Neste contexto, a abordagem *bottom-up* basicamente consiste em observar de que modo o comportamento individual agregado resulta colectivamente.

Breve descrição do modo de funcionamento de uma SSBA:

- Desenvolvimento de uma Simulação:

A simulação inicia-se pela especificação de regras que modelem o comportamento individual dos “Agentes”, por exemplo: como se devem mover pelo espaço, como devem interagir com os outros agentes, etc. As regras podem ser poucas e simples, embora suportadas em informações recolhidas do mundo real.

- Utilização de uma simulação:

Depois de especificadas as regras, podemos accionar a simulação e observar os resultados agregados gerados pela interacção dos agentes. Destes resultados esperam-se algumas semelhanças com os fenómenos sociais do mundo real, exigindo-se saídas que mostrem algumas regularidades.

- Interpretação dos resultados da simulação:

Através de várias repetições da simulação, com diferentes situações e diferentes regras, podemos obter mais conhecimento acerca do relacionamento entre as acções individuais dos agentes e do resultado agregado, desde que as relações sejam tratáveis. Este processo de pesquisa pode ajudar-nos a teorizar acerca das relações entre os comportamentos individuais e os resultados colectivos no mundo real.

“A modelação baseada em agentes é a terceira via de fazer ciência. Tal como a análise dedutiva, parte de uma série explícita de conceitos. Mas de modo diferente da dedução, não prova teoremas. Em vez disso, um modelo baseado em agentes gera dados simulados que podem ser analisados indutivamente. Também de modo diferente do método indutivo, os dados da simulação resultam de uma série de regras rigorosamente especificadas recolhidas da medição directa do mundo real. Enquanto a proposta da indução visa descobrir padrões e a dedução visa encontrar consequências dos conceitos, a proposta da modelação baseada em agentes visa auxiliar a intuição”. (Axelrod, 1997, pag. 3-4)

Embora existam várias “ferramentas” de simulação, neste trabalho optou-se pela Simulação Multi-Agente pela suas características específicas, que seguidamente se descrevem.

4.3.3.1 Simulação multi-agente (SMA)

A origem da simulação baseada em sistemas de multi-agentes (SMA) é atribuída à percepção de que muitos métodos de análise desconsideram as regularidades emergentes na dinâmica do sistema, facto que reduz a capacidade de intervenção do modelador. Por isso, Villegas (2001) propõe uma simulação baseada em sistema de multi-agentes (SMA) que considere as emergências surgidas na trajectória do sistema.

A simulação baseada em sistemas de multi-agentes (SMA) é uma ferramenta que pode ser empregue em domínios que estudam os fenómenos, considerando a fronteira de racionalidade do sujeito e pode ser usada na modelação de sistemas complexos (VILLEGAS, 2001).

A simulação baseada em SMA gera, a partir da simulação computacional, a dinâmica do sistema complexo. Isso ocorre como resultado da interacção entre os simples agentes do sistema. A ideia é que surjam um comportamento complexo que pode ser observado nos sistemas empíricos, como produto das interacções individuais.

Nesse sentido, Villegas (2001) destaca que, normalmente, a simulação baseada no MAS exhibe uma dinâmica muito complexa, facto que concentra a atenção do modelador, mas também dificulta a compreensão. Assim, reduzir a dificuldade em capturar o comportamento desses sistemas pode ser a chave para compreendê-los, tornando-se uma tentativa das ferramentas que usam o processo de simulação.

O autor apresenta dois meios formais de simulação computacional, usualmente conhecidos e empregues para tentar compreender a dinâmica de funcionamento dos sistemas complexos. O primeiro é a projecção ou desenho e o segundo é a observação da dinâmica usada na análise post hoc.

Segundo Villegas (2001), no SMA, é possível prospectar procedimentos com base nos modelos formais de comportamento do agente. Eles podem auxiliar o modelador a compreender o comportamento dos agentes individuais. Os procedimentos componentes dos modelos formais apresentam limitações para compreender o comportamento dos grupos de agentes autónomos. Até a mais rigorosa prospecção pode exibir um comportamento imprevisível, pois as simulações dinâmicas adquirem um subtil estado de transição e um amplo número de dados de transição. Além disso, são associadas a essa limitação o fato de que os sistemas simulados no MAS apresentam alto nível de complexidade, enquanto o modelador possui uma barreira de racionalidade que limita a percepção do nível de complexidade.

Segundo Domingo et al. (1996), por causa da barreira de racionalidade do modelador, a simulação é analisada pelo uso da dinâmica post hoc, que se tornou a mais usual abordagem para estudar o MAS. Entre as metodologias existentes para realizar a análise post hoc, estão: a análise de cenário (Godet, 1993; Domingo et al., 1996), na qual o objectivo do MAS é investigar o sistema numa simples trajectória no tempo e a abordagem de Monte Carlo (Zeigler, 1976), na qual o MAS é repetidamente rodado. Nesse processo, são geradas informações estatísticas, pelo método Monte Carlo, sobre as tendências gerais exibidas pela trajectória do sistema.

Um modelo baseado em agentes requer um conhecimento realista dos “agentes” e dos componentes do sistema assim como das regras escritas e não escritas através das quais eles operam, de modo a permitir que o modelo reproduza o comportamento colectivo dos agentes quando se introduzem novas informações ou produzem alterações no sistema. Depois da construção do modelo é possível realizar simulações em muitos aspectos diferentes do sistema de modo a observar de que modo as mudanças realizadas afectam as interdependências e a dinâmica do sistema como um todo. Este método de pesquisa tem sido utilizado para testar sistemas de segurança, infra-estruturas de protecção, ecossistemas florestais, alterações climáticas, ecossistemas marítimos, novas doenças e padrões de enfermidades (Sanders, 2003, pag. 6).

4.3.4 A modelação

Segundo Leite (2004), para Le Moigne (1977), modelar é conceber, para um objecto, um modelo que permita conhecê-lo, compreendê-lo, interpretá-lo e que auxilie na antecipação do seu comportamento. Na visão deste autor, o observador é um sujeito activo que procede a

uma descrição comunicável do que percebe e do que concebe. Burke (2000) ressalta que a complexidade de um sistema está relacionada com o seu observador. A modelagem é representada pela dimensão que assume o esquema usado pelo observador para descrever o sistema. Para Morin (2001), as visões do mundo são as traduções do mundo. Interpreta-se a realidade em representações, noções, ideias e, depois, em teorias. Para Villegas (2001), um modelo é, em geral, uma representação de um objecto (numa posição realística) ou a representação de uma ideia (numa posição idealista) que o sujeito cria de um determinado fenómeno. Colella, Klopfer e Resnick (2001) argumentam que as maneiras de se perceber o mundo são profundamente influenciadas pelas ferramentas que estão disponíveis e são utilizadas. Nesse sentido, Gattaz (2001) lembra que a percepção do mundo não pode ser dissociada das experiências do sujeito que a descreve, pois é a experiência individual, na absorção das demais interpretações, que o conduz à reconstrução da realidade. Nero (2001) destaca que a modelação é um processo de conversão da percepção da realidade em representação. A noção de modelação mostra que o observador extrai propriedades das coisas do mundo real para obter uma representação do mundo físico, a qual deve ser capaz de tratar a complexidade inerente a esse mundo físico.

Por outro lado, Edgar Morin (1977) adverte sobre as várias dimensões que assume cada fenómeno. Como exemplo, cita a concepção de homem, que ora pode ser visto como individual, ora social, ora biológico. Logo, para modelar um fenómeno de forma que represente a realidade, é preciso considerar as várias dimensões que o compõem. Em geral, é muito difícil representar todas as dimensões que constituem um fenómeno num único modelo. Por isso, podem-se considerar, apenas, algumas das dimensões, desde que se tenha consciência de que o fenómeno possui outras dimensões que não são contempladas no modelo.

Nota-se que o conceito de modelação está directamente ligado à percepção que o observador possui do mundo e, por consequência, do objecto que ele deseja representar. Por sua vez, o modo de perceber o mundo está relacionado ao paradigma que norteia determinado período de tempo. Por isso, segundo Le Moigne (1977), existem dois grandes grupos de modelagem: a modelagem analítica, com base no paradigma cartesiano, e a modelagem sistémica, com base na complexidade. A primeira segue a lógica da disjunção entre o objecto e o sujeito, objectivos da qual é controlar, eliminar a complexidade, dividir o objecto em partes, isolando-o do seu contexto. A segunda segue a lógica da associação entre objecto e sujeito, objectivos da qual é articular, encontrar a complexidade e aproveitar a riqueza da diversidade,

considerando o objecto como um sistema em interacção com o seu contexto.

4.4 Instituto de Santa Fé

O ISF situa-se em Santa Fé, no estado do Novo México, nos EUA e foi fundado em 1984. Trata-se de um instituto privado, sem fins lucrativos, que funciona como centro de pesquisa e de educação multidisciplinar, envolvendo as áreas da física, biologia, computacional e ciências sociais. O objectivo da sua investigação visa entender os sistemas complexos adaptativos para responder aos desafios tecnológicos, biológicos, económicos e políticos.

Este instituto conta com a colaboração de cientistas e de investigadores reconhecidos, de agências governamentais, de institutos de pesquisa e de indústrias privadas com o fim de procurar descobrir os mecanismos da simplicidade existentes no nosso complexo mundo.

4.5 Conclusões

Neste capítulo discutiram-se os conceitos de complexidade, de sistemas complexos, de sistemas complicados, sistemas adaptativos complexos, de ciências da complexidade e da sua metodologia científica, a simulação computacional e a modelação.

Tendo-se concluído que a complexidade pode resultar do comportamento, da estrutura ou do funcionamento dos sistemas complexos e que os sistemas complexos se caracterizam por exibirem propriedades de emergência que resultam das interacções individuais agregadas, formando deste modo o todo, que é mais que a soma das partes. Para além da emergência, estes sistemas caracterizam-se ainda pela sua imprevisibilidade, instabilidade, incerteza, adaptabilidade, evolução, auto-organização e irreducibilidade.

Face a estas características, um grupo de cientistas do Instituto de Santa Fé, em meados da década de 80, questionou a capacidade e a metodologia científica tradicional, de pendor reducionista, para tratar este tipo de sistemas, considerando que a sua redutibilidade às partes constituintes impedia a observação do todo. Assim, deram origem uma ciência multidisciplinar destinada a tratar sistemas complexos, designada por ciências da complexidade.

O objecto de estudo, o campo de investigação e a metodologia desta nova ciência visam a observação holística dos sistemas complexos existentes em várias áreas científicas, desde as ciências naturais às sociais. A diferença metodológica desta ciência prende-se com a simulação do mundo real através da modelação dos sistemas e da sua experimentação em laboratórios computacionais, cujos resultados podem despertar intuições sobre os fenómenos.

Deste modo, parecem respondidas as questões formuladas no capítulo anterior. Esta nova forma de fazer ciência permite uma observação holística do sistema rodoviário e do fenómeno da sinistralidade e também a possibilidade de “autopsiar” virtualmente sistemas vivos, através da representação sintética do real.

Assim, suscita-se uma nova questão: Integrará o sistema rodoviário o campo de investigação e o objecto de estudo das ciências da complexidade, ou seja, poder-se-á considerar o sistema rodoviário um sistema complexo?

A resposta a esta questão vou tentar formulá-la no próximo capítulo.

“A crash is not an accident; it is not a chance event; it is not an act of God.” (Martin Perscheid)

Capítulo 5

ANÁLISE DO SISTEMA E DO CONFLITO RODOVIÁRIO

Neste capítulo vou analisar o sistema rodoviário (SR), o conflito rodoviário (CR) e relacionar estes conceitos com os diferentes tipos de sistemas já identificados, esperando deste modo encontrar a resposta para a questão colocada no final do capítulo anterior.

5 Sistema rodoviário

O SR é composto por quatro dimensões principais, a saber: o factor via (infra-estrutura rodoviária), o factor veículo (automóvel), o factor humano (condutor e peão) e o factor ambiente.

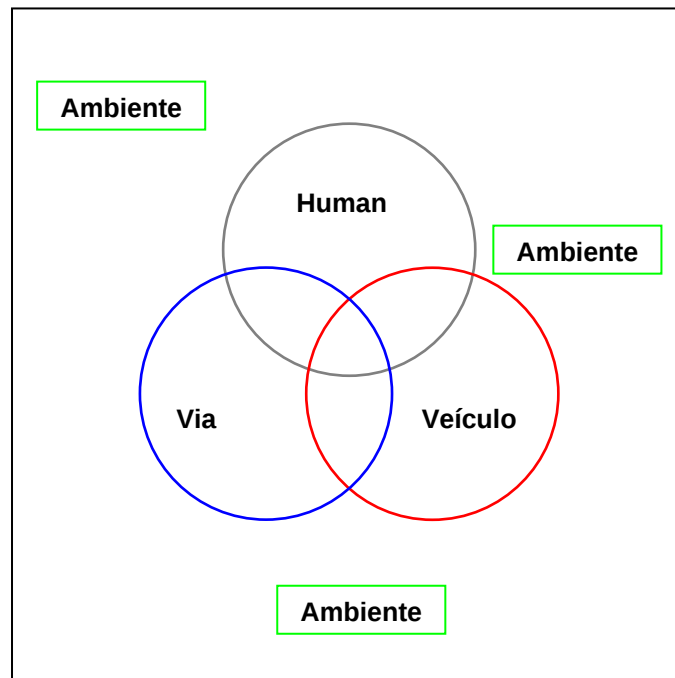


Figura 5.1 – Composição de sistema rodoviário.

Cada um dos factores do SR constitui-se, por si só, num subsistema daquele. O seu funcionamento resulta pela interacção contínua e entrelaçada dos seus subsistemas, ou seja, para funcionar tem de possuir continuamente, em simultâneo, em cada unidade de espaço e de tempo, pelo menos, um veículo, uma via, um condutor e um ambiente. A interacção entre estes factores resulta da acção do factor humano através do processo individual de condução do veículo. Por vezes, da interacção entre os factores identificados ou entre os diferentes actores rodoviários (condutores e peões) resultam conflitos que se consubstanciam na

interrupção do trânsito e da mobilidade. Esta interrupção pode ser originada, entre outros motivos, por acidentes de viação.

5.1 Caracterização do subsistema rodoviário

Cada um dos subsistemas anteriormente referidos é composto por diferentes tipos de elementos, ou seja, o subsistema de infra-estruturas é composto por vias, o subsistema veículo é composto por automóveis, o subsistema humano é composto por pessoas, que desempenham o papel de condutores, de peões ou de passageiros, e o subsistema ambiental é composto pelo ambiente.

Assim, considera-se necessário descrever cada uma das partes ou subsistemas e identificar os elementos específicos que os compõem.

5.1.1 Factor via

A via é fruto da tecnologia humana. O factor via é uma infra-estrutura física onde circulam os veículos e as pessoas. Esta consiste num meio de comunicação terrestre destinada ao trânsito rodoviário e pedonal. Quando aqui se utiliza o termo Via, pretende-se referir a Via Pública (VP), ou seja, uma via de comunicação terrestre afecta ao trânsito público, como a conceptualiza o Código da Estrada Português (CE). Existem várias formas de vias, de acordo com os atributos que as diferenciam, como sendo: a classe, a geometria, os sentidos de trânsito, as intersecções e os pavimentos, conforme se conceptualiza no Glossário de Terminologia constante do Apêndice 2.

No que respeita às vias, há ainda a considerar uma variedade de classes de infra-estruturas rodoviárias: as auto-estradas, com duas vias em cada sentido e com separador físico dos sentidos de tráfego; as estradas nacionais, com apenas duas vias em cada sentido e sem separador físico dos sentidos de tráfego; e as vias urbanas ou arruamentos com um ou mais sentidos de tráfego e, normalmente, sem separador de sentidos de tráfego.

5.1.2 Factor veículo

O veículo automóvel é também fruto da tecnologia e consiste num instrumento de mobilidade rodoviário auto-propulsionado, que se pode destinar ao transporte de pessoas, de mercadorias ou misto.

No concernente aos veículos, existe uma grande variedade de tipos de veículos, que aqui se identificam pelas suas características genéricas: os veículos ligeiros de transporte de

passageiros ou de mercadorias; os veículos pesados de transporte de passageiros ou de mercadorias; e os veículos de duas rodas, com ou sem motor.

5.1.3 Factor ambiente

O factor ambiente integra mais um dos subsistemas do SR. O ambiente, para efeitos da circulação rodoviária, poder-se-á caracterizar pelas condições atmosféricas, de luminosidade, de visibilidade, de tráfego e outras menos tangíveis como são as normas de circulação rodoviária.

Este factor, por vezes, é analisado como fazendo parte das condições da via. Porém, no meu parecer deve considerar-se, como mais um factor com identidade própria, como mais um elemento de interacção do sistema porque não influencia apenas as condições da via mas também o desempenho dos restantes factores que compõem todo o sistema.

O factor ambiente, no que concerne ao sistema rodoviário, resulta das forças da natureza e da acção humana, esta, no que respeita ao tráfego e às normas de circulação rodoviária.

5.1.4 Factor humano

O factor humano, considerando-o no papel de actor rodoviário, constitui-se no principal subsistema do SR. O factor humano, como actor rodoviário, neste trabalho, é analisado apenas no desempenho dos papéis de condutor e de peão, pelo que pode ser caracterizado: pelo seu papel, pelo número de agentes em interacção e pelas suas características específicas, enfatizando-se, o sexo, o escalão etário, as capacidades físicas e psicológicas e as competências técnicas.

O factor humano concebeu o SR para rentabilizar o tempo e o espaço. É de todos os subsistemas o único que tem a capacidade de perceber, raciocinar e decidir, pelo que o sistema rodoviário depende fundamentalmente da sua acção. De todos os subsistemas que interagem no sistema rodoviário é o mais complexo, não só pela sua complexidade individual, senão também pela complexidade resultante da interacção entre si.

5.2 Interacção dos elementos no sistema rodoviário

A interacção no SR depende de dois processos distintos, o *individual* e o *colectivo*, a que correspondem dois níveis distintos de complexidade:

- O individual, menos complexo, resulta da interacção isolada do condutor, com o seu próprio veículo, com a via e com o ambiente que o rodeia, na mesma unidade de tempo e de espaço, conseguindo assim a sua *mobilidade*;

- O colectivo, mais complexo, resulta do somatório das interacções individuais dos condutores e peões, numa mesma unidade de espaço e de tempo, ou seja, da interacção de um maior ou menor número de condutores e peões interagindo entre si e com as suas próprias circunstâncias, dando deste modo lugar ao *trânsito*.

Poder-se-ia também isolar a interacção do veículo com a via, porém, esta interacção está dependente da acção do condutor, pelo que se considera incluída no nível de interacção individual do condutor, dado que o veículo não interage com a via sem a acção deste.

Assim, poder-se-á dizer que a interacção do SR depende fundamentalmente da acção de um elemento “protagonista”, o factor humano, no papel de condutor, pelo que se vai proceder à descrição deste processo.

5.2.1 Processo de condução

Segundo Henriksson e al (2007), Ranney (1994) refere que nunca foi desenvolvido nenhum modelo compreensível, sobre o processo de condução, que representasse a ampla variedade de situações de condução associadas à componente das aptidões, mas espera que brevemente surja uma proposta. Por outro lado, McKnight e Adams (1971), nas suas pesquisas sobre o problema, identificaram no processo de condução 45 tarefas principais e 1700 tarefas elementares, o que não trouxe nada de novo em relação ao objectivo de modelar este processo.

Todavia, Henriksson e al. (2007) tentou conceber uma definição para o acto de conduzir, tal como: *“Uma multiplicidade de tarefas e de processos resultantes da interacção do condutor com o ambiente e com o veículo, que consistem em controlar a velocidade, mudar de direcção e contornar obstáculos”*.

Autores citados por Shinar (2007), como Michon (1985) e Janssen (1979), modelaram o processo de condução dividindo-o em três níveis de decisões: o *nível estratégico* (de planeamento), o *nível tático* (de navegação) e o *nível operacional* (manobra e controlo), que designaram por “hierarquia de decisões”, modelo que se descreve seguidamente.

5.2.1.1 Modelo do processo de condução: hierarquia de decisões

O acto de conduzir é uma tarefa realizada num ambiente de grande mobilidade, cujo objectivo é a deslocação de um local para outro com segurança. Janssen (1979) modeliza o processo de decisão de um condutor como um sistema hierárquico, (1979), cujo modelo se ilustra na figura 5.2. O sistema hierárquico de decisões tem três níveis: o nível mais alto consiste nas decisões

estratégicas, o nível intermédio consiste nas decisões táticas de navegação e o nível mais baixo consiste nas decisões operacionais de controlo.

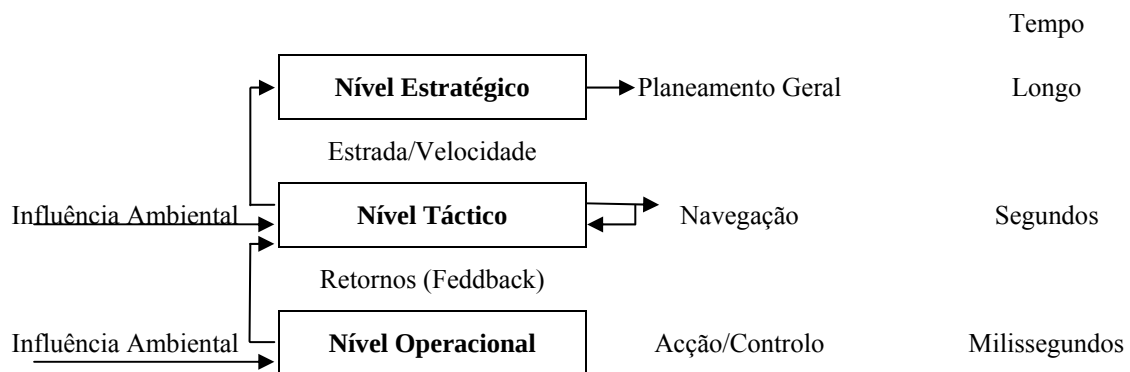


Figura 5.2 – Estrutura hierárquica das tarefas de condução. (Michon, 1985)

As decisões estratégicas, do primeiro nível (de planeamento), correspondem à escolha do modo de transporte: conduzir o próprio veículo ou tomar um transporte público ou adiar a visita, escolher o itinerário, a hora de partida, etc. As decisões sobre estas escolhas dependem do prazer ou não da condução, do tempo disponível, do custo económico da viagem e das últimas informações sobre o tráfego. Estas são as questões que têm de ser resolvidas antes de iniciar a viagem.

Tomada a decisão de conduzir o próprio veículo, surgem as decisões de segundo nível, tático ou de navegação. Estas decisões são tomadas durante a condução e incluem a melhor forma de evitar obstáculos, quando e como mudar de via de circulação ou fazer uma ultrapassagem, abrandar ou acelerar face a um sinal amarelo, etc.

Por último, surgem as decisões de terceiro nível, operacionais ou de controlo, estas são na sua maioria automáticas ou inconscientes e implicam, em cada momento, acções de resposta a diferentes estímulos. Estas acções consistem em acelerar ou desacelerar, sinalizar a marcha, mudar de velocidades, observar os espelhos retrovisores nas mudanças de faixa, fazer travagens suaves ou bruscas, guinar a direcção face a uma situação inesperada, parar nos semáforos, acelerar após a paragem, etc.

As aptidões e os hábitos de condução têm um papel muito importante no nosso desempenho ao nível operacional ou de controlo do veículo, tanto que o modelo de aprendizagem da condução se centra na aquisição destas competências. Embora estas competências nem sempre sejam responsáveis por uma condução segura, quase sempre possuem um papel fundamental na prevenção de acidentes, quando o condutor se encontra numa situação de perigo inesperada (Shinar, 2007).

As decisões que um condutor toma em cada nível são muito importantes, porque quando combinadas com as aptidões e as deficiências específicas do condutor podem afectar directamente o nível de risco de envolvimento num acidente (Hakamies-Blomqvist, 2006).

As decisões que tomamos em cada nível da hierarquia são baseadas nos objectivos que gostaríamos de alcançar. Assim, se ao nível estratégico, decidirmos alcançar o nosso objectivo com um mínimo de tempo, tal poderá implicar (1) a escolha do veículo próprio em vez do transporte público (2) circular pela faixa mais rápida da via à velocidade máxima possível e (3) minimizar as travagens ultrapassando continuamente os outros veículos.

Porém, note-se que o comportamento na condução não ocorre em vácuo mas sim sob as influências ambientais. Estas não incluem apenas as influências directas da via, entradas e saídas, mas também o tráfego, as condições meteorológicas e de iluminação, assim como, as influências menos tangíveis, como sejam, as leis rodoviárias, normas de comportamento e de cultura que regem a nossa forma de conduzir (Shinar, 2007).

Por outro lado, este modelo sugere influências recíprocas dos diferentes níveis, ora das decisões tomadas de cima-para-baixo (top-down), ora das informações cíclicas de retorno (feedbacks) de baixo-para-cima (bottom-up). Assim, como exemplo, num tráfego do tipo pára-arranca, devido a um congestionamento, pode fazer-nos reconsiderar algumas das decisões de navegação, como mudar para a faixa que nos parece mais rápida, ou mudar uma decisão estratégica, como fazer uma paragem para tomar uma refeição rápida, na esperança de que quando retomada a condução o congestionamento se tenha dissipado. Assim, as decisões em qualquer dos níveis podem ser alteradas em qualquer momento e as variáveis que regem cada nível podem operar em todos os momentos. Deste modo o comportamento na condução torna-se algo complexo de descrever e ainda mais difícil de entender por parte dos outros condutores. É disso exemplo, o caso de um condutor que de repente corta a faixa em que seguimos, perigosamente perto da frente do nosso veículo, a fim de sair da via no último instante possível (Shinar, 2007).

Segundo Pedro Oliveira (2007), conduzir na via pública (VP) é uma tarefa deveras complexa que requer algo mais do que o conhecimento e o cumprimento do C.E.: requer atenção especial ao veículo conduzido e ao que fora dele se passa, ou seja, à infra-estrutura rodoviária (à via e à sinalização, aos veículos terceiros, aos peões, às condições climáticas, aos obstáculos); requer uma postura defensiva de condução; requer civismo e espírito de cooperação avesso à competitividade e agressividade na estrada, qual recinto de batalha;

requer, também, um estado psico-físico adequado à prática; e requer também uma boa e completa formação teórico-prática. Circular na VP é, pois, um exercício que envolve a dinâmica do próprio veículo em harmonia com a dinâmica dos restantes numa interacção constante, cada um permeável à influência dos diversos factores.

Assim, poder-se-á concluir que o conflito rodoviário pode surgir das decisões que cada condutor toma em cada nível, combinadas com as aptidões e deficiências específicas do condutor. Deste modo, seguidamente vou abordar o problema do conflito rodoviário.

5.3 Conflito rodoviário

O conflito rodoviário resulta da instabilidade do sistema rodoviário e manifesta-se também através de acidentes viação, ou seja, do conflito entre os veículos, entre estes e as áreas adjacentes à infra-estrutura rodoviária ou entre veículos e peões. Dos acidentes de viação resultam sempre danos materiais e muitas vezes vítimas pessoais, conforme a caracterização feita no Cap. II deste trabalho.

5.3.1 Acidente de viação

O acidente, genericamente considerado, é um acontecimento fortuito ou eventual que altera a ordem das coisas e que involuntariamente origina danos às pessoas ou objectos. Deve distinguir-se claramente deste conceito o acontecimento que provoca danos de modo voluntário por acção do sujeito interveniente. Se um condutor atropela um peão com a intenção de lhe provocar a morte não pode considerar-se esta acção como um acidente mas sim como um acto de delito doloso. (Borrel Vives et al, 1991).

Todavia, existem acidentes de vários tipos, designadamente, domésticos, desportivos, de trabalho, etc. Para o presente trabalho interessa-nos circunscrever os acidentes ocorridos em ambiente rodoviário, ou seja, os acidentes de viação. Porém, existem várias definições como se pode observar pelos casos seguidamente apresentados:

Em Portugal, o conceito de acidente de viação é o seguinte: *“Ocorrência na via pública ou que nela tenha origem envolvendo pelo menos um veículo do conhecimento das entidades fiscalizadoras da qual resultem vítimas e ou danos materiais”*. (D.G.V., 1998)

Nos EUA é a seguinte a definição: *“Uma ocorrência que produz danos humanos ou materiais, envolve um veículo motorizado em transporte de pessoas ou bens e ocorre numa via ou enquanto o veículo se encontra em movimento mesmo após sair da via de circulação.”* (IRTAD, 1998). É ainda referido que nos trabalhos e estudos desenvolvidos no âmbito da

National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) não será utilizada a expressão *acidente* uma vez que a sua utilização continuada promove o conceito de que este tipo de ocorrência está fora do controlo e influência humana. Sobre este tema acrescenta ainda que as expressões “*crash* (choque), *collision* (colisão) or *incident* (incidente)” constituem termos mais apropriados, devendo ser encorajada a sua utilização. (NHTSA, 2007).

Em Espanha acidente é: “*O que ocorre numa via pública, envolvendo pelo menos um veículo motorizado e do qual resulta pelo menos uma pessoa com ferimentos ou morte*” (IRTAD, 1998).

Em França não há uma definição oficial e não são considerados acidentes de viação os que resultem em apenas danos materiais” (IRTAD, 1998).

Na Grã-Bretanha acidentes de viação são: “*Os acidentes que ocorrem na via pública envolvendo pelo menos um veículo e tendo como resultado a morte ou ferimento de pessoas*”. Também não são contabilizados os acidentes dos quais resultem apenas danos materiais” (IRTAD, 1998).

Face à diversidade de situações existentes, que comprometem a comparabilidade internacional de dados sobre o tema, foi aprovada a seguinte definição oficial para *acidente de viação* a utilizar em estatísticas internacionais:

“... o que ocorre ou tem origem numa via ou estrada aberta à circulação rodoviária pública; do qual resulta uma ou mais vítimas mortais ou com ferimentos e no qual pelo menos um veículo está envolvido. Estes acidentes incluem colisões entre veículos, veículos e peões, veículos e animais ou veículos e obstáculos fixos. Incluem ainda situações de acidente no qual apenas um veículo esteja envolvido não havendo o envolvimento de mais nenhum utilizador da via.” (IRTAD, 1998, pg 13). Na sequência desta decisão todos os países que integram as bases de dados IRTAD ou CARE deverão proceder a um esforço de uniformização dos respectivos dados sobre acidentes de viação.

5.3.2 Causas do conflito rodoviário

O sistema rodoviário é um invento moderno, emergido no início do Séc. XX e, consequentemente, o fenómeno da sinistralidade é também um evento recente, daí que o conhecimento sobre a sua causalidade se considere ainda insuficiente e o fenómeno se continue a manifestar ano após ano com grande intensidade. As causas conhecidas sobre o conflito rodoviário prendem-se com todos os factores intervenientes no sistema rodoviário, em partes diferentes, conforme foi caracterizado no capítulo segundo desta dissertação.

Porém, os estudos existentes são unânimes em atribuir a parte mais significativa das causas ao factor humano. Logo, a intervenção preventiva e o esforço de investigação deverá estar orientado para este factor.

No que respeita ao factor humano as causas identificadas prendem-se sobretudo com comportamentos de risco, falhas de percepção, erros de decisão e incapacidade física, conforme a distribuição apresentada na quadro seguinte:

Quadro 5.1 – Causas humanas de acidentes de viação (NHTSA, 1997).

Causas Humanas	Influência (%)
Falta de Atenção	22,7
Velocidade de Circulação	18,7
Influência do Álcool	18,2
Erros de Percepção	15,1
Erros de Decisão	10,1
Incapacidade Física	6,4
Total	91,2

As causas humanas dos acidentes aqui apresentadas resultam da observação de um número de casos ocorridos durante um determinado período de tempo em lugares e circunstâncias completamente diferentes, pelo que não existe um ponto de observação comum ou uma plataforma de testes uniforme, nem é possível consegui-los na realidade, a não ser em laboratórios específicos de “*crash-tests*” com a utilização de veículos reais e de “*demis*” (maquetes de pessoas). Porém, este tipo de laboratórios apresentam custos elevadíssimos, para além do facto das situações de acidentes poderem ser tão diversas e numerosas que se torna incomportável testá-las a todas. Cada caso é um caso, tipificado por cada metro de estrada, por cada tipo de veículo, por cada tipo de condutor, por ambientes completamente díspares, etc., enfim, uma infinidade de situações.

Por outro lado, nem todos os condutores alcoolizados têm acidentes, nem todos os condutores que circulam em excesso de velocidade têm acidentes, nem todos os erros de decisão ou de percepção dão origem a acidentes e por aí fora. Logo, não existe uma relação directa entre a causa e o efeito. Existem causas possíveis, mas que nem sempre dão origem aos mesmos resultados. Assim, o fenómeno é incerto, podendo considerar-se *não-determinístico*. “*O determinismo é a concepção segundo a qual todos os fenómenos são determinados por causas. Numa forma filosófica extrema, o determinismo afirma que qualquer acontecimento presente ou futuro se encontra contido nas suas causas anteriores, elas próprias redutíveis a*

um primeiro acontecimento, a partir do qual ele poderia, em princípio, ser previsto. Numa forma bastante menos ambiciosa, o determinismo, cujo postulado de que a natureza não obedece ao capricho, mas a uma ordem de causalidade...” (Doran, Roland & Parot, Françoise, 2001)

Por outro lado, em termos geográficos, o fenómeno manifesta-se de forma aleatória, podendo ocasionalmente repetir-se num determinado troço de estrada, dando assim origem a um “Ponto Negro¹” ou a um “Ponto Cinzento²” e continuar a manifestar-se ao longo tempo, até ser feita uma intervenção na via, ou simplesmente desaparecer sem qualquer razão aparente, podendo reincidir ou não nos anos seguintes.

Em resultado dos dados estatísticos, verifica-se também que nas deslocações rodoviárias sazonais, como são os casos do Natal, do Fim-de-Ano e da Páscoa, ora se obtêm deslocações mais seguras, ora menos seguras, em razão do número de vítimas mortais registadas, bastando para tal que o número de vítimas mortais seja maior ou menor que no ano comparativo, normalmente, o ano anterior, independentemente do número total de acidentes registados ter subido ou descido. Daí que a razão entre o número de vítimas e o número de acidentes também não é fácil de estabelecer. Para além disso, nem todos os acidentes de viação são registados, são-no apenas aqueles cujos intervenientes dão deles conhecimento às entidades competentes. Logo, o conflito rodoviário resulta também de um processo aleatório não probabilístico, ou seja, de um processo *estocástico*.

“Estocástico diz-se dos fenómenos de que se não pode predizer a origem, quer porque escapam a toda a lei, quer porque as suas causas são demasiado complexas. Um dos casos mais conhecidos do processo estocástico é a cadeia de Markov...trata-se essencialmente de uma sequência de variáveis aleatórias, cujo comportamento no instante n é a única função dos valores tomados no instante $n-1$. Toda a memória do processo está contida no último estado conhecido.” (Doran, Roland & Parot, Françoise, 2001) Como exemplo, atente-se no caso de em dez lançamentos de um dado com seis faces surgirem as seguintes sequências não aleatórias: 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1. ou 1,2,3,4,5,6,1,2,3,4, o que é perfeitamente possível, mas improvável, apesar de ter surgido de um evento aleatório: o lançamento do dado.

Conforme se disse, acerca dos dados estatísticos conhecidos sobre a sinistralidade rodoviária, estes são de mera constatação do fenómeno, ou seja, apenas relatam o número de casos

¹ **Ponto Negro**, lanço de estrada com o máximo de 200 metros de extensão, no qual se registaram, pelo menos, 5 acidentes com vítimas, no ano em análise, e cujo indicadores de gravidade é superior a 20.

² **Ponto Cinzento**, uma zona de acumulação de acidentes que não corresponda a um ponto negro.

ocorridos. Sobre as suas causas existem apenas alguns estudos dispersos. Em todo o caso, as variáveis identificadas nesses estudos relacionam-se com factores de comportamento e de risco constatáveis, observáveis e mensuráveis.

Porém, conforme resulta da descrição do acto de conduzir, verifica-se que existem outras variáveis que não são passíveis de observação e/ou de mensuração: algumas embora observáveis e mensuráveis perdem-se pela impossibilidade de reconstituir toda realidade física das circunstâncias em que o acidente ocorreu, como por exemplo, as condições atmosféricas (de visibilidade e de luminosidade), outras porque não é manifestamente possível observá-las nem medi-las, como por exemplo, quantificar o tempo de reacção manifestado pelo condutor, a quantidade de atenção que prestava à condução, o comportamento tido pelo condutor antes do acidente.

O acidente, apesar da sua rapidez, não se produz de uma forma instantânea, antes sofre uma evolução que se desenvolve no tempo e no espaço, mediante uma série de circunstâncias sucessivas que se vão produzindo até ao surgimento do resultado final. (Borrel Vives et al., 1991).

Por experiência própria, das funções profissionais desempenhadas, devo acrescentar que raramente existem testemunhas de acidentes de viação. As testemunhas normalmente são os próprios intervenientes ou os passageiros dos veículos. Porém, o acidente, como se disse, embora não ocorra de modo instantâneo ocorre num tempo muito reduzido, entre dois e quatro segundos, pelo que as testemunhas não conseguem reconstituir todas as circunstâncias que envolveram o acidente. Normalmente o que acontece quando existem testemunhas isentas, exteriores ao acidente, é que estas ouvem um forte estrondo ou um chiar de pneus, olham na direcção do ruído e o que vêem é simplesmente uma nuvem de pó ou um veículo já desgovernado, nada podendo dizer acerca da sua causalidade.

5.3.3 Consequências do conflito rodoviário

As consequências dos acidentes prendem-se sobretudo com: a ocorrência de danos materiais, nos próprios veículos, nas infra-estruturas rodoviárias e áreas adjacentes a estas; e com a ocorrência de danos pessoais, vítimas mortais, feridos graves e feridos leves. (Apêndice 2)

Existe uma relação entre a gravidade dos acidentes e a velocidade de circulação dos veículos aquando dos sinistros: a energia cinética envolvida varia com o quadrado da velocidade e na razão directa da massa dos veículos. Por outro lado, através de estudos pormenorizados de acidentes, tem-se constatado, pela biodinâmica, que, para velocidades elevadas, a gravidade

dos ferimentos originados é maior do que o previsível por aplicação simples dos princípios físicos associados às energias envolvidas. De acordo com a experiência britânica, relatada no projecto DUMAS, a velocidade do veículo é factor determinante da gravidade dos ferimentos originados por atropelamentos de peões: a cerca de 32 km/h somente 5% dos casos são fatais; a 48 km/h, aproximadamente 45% dos casos serão fatais; e se a velocidade do veículo for de 64 km/h, cerca de 90% das vítimas virão a falecer (Cardoso, 1999).

A relação entre a velocidade e o risco de acidente está menos bem estabelecida do que a relação entre velocidade e gravidade. São no entanto conhecidos os resultados dos estudos de Solomon e de Munden, apontando para uma configuração em “U” da relação entre a velocidade dos veículos e a respectiva taxa de acidentes: os condutores circulando a velocidades afastadas (para cima ou para baixo) da velocidade média de circulação da corrente de tráfego terão taxas de acidentes acrescidas (Cardoso, 1999).

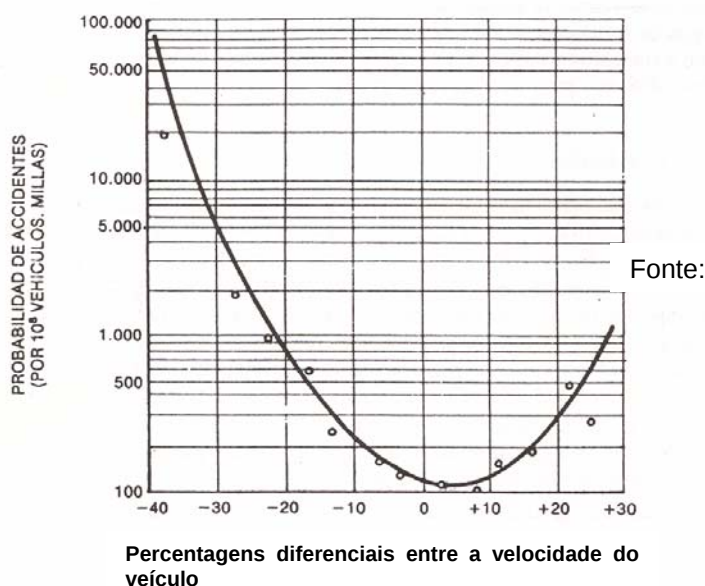


Figura 5.3 – Relação entre a dispersão de velocidades e a sinistralidade. (Borrel e al., 1991)

Assim, há que distinguir dois aspectos sobre a influência da velocidade na segurança: por um lado, a velocidade média da circulação e por outro, a diferença de velocidade entre os diferentes veículos, ou seja, a dispersão de velocidades.

5.4 Sistema rodoviário como sistema complexo

Depois de descritos, analisados e caracterizados os factores que integram o SR e o seu modo de interacção, assim como, o conflito rodoviário, o acidente de viação, as causas humanas conhecidas e as suas possíveis consequências; chegou o momento de relacionar o sistema rodoviário com os diferentes tipos de sistemas (Cap.4).

Para estabelecer esta relação vou comparar os subsistemas do SR com as propriedades específicas dos diferentes tipos de sistemas através da matriz que se segue.

Quadro 5.2 – Matriz de comparação dos factores do SR com as propriedades dos diferentes sistemas.

Tipo de Sistema /Subsistema		Atributos														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	Adaptativo	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X
	Complexo	X	X	X	X	X	X	X		X		X	X	X		X
	Complicado	X	X	X		X									X	
	Factor Via	x	x	x		x									x	
	Factor Veículo	x	x	x		x									x	
	Factor Ambiente	x	x	x	x	x	x		x	x			x	x		x
	Factor Humano	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x		x

Legenda das Propriedades: (1) – Quantidade; (2) – Heterogeneidade; (3) – Variedade; (4) – Variabilidade; (5) – Interdependência; (6) – Imprevisibilidade; (7) – Evolução; (8) – Instabilidade; (9) – Incerteza; (10) – Adaptabilidade; (11) – Auto-organização; (12) – Irredutibilidade; (13) – Emergência; (14) – Interacção linear; (15) – Interacção não-linear.

A matriz representada na quadro 5.2 considera-se uma tentativa “arriscada” de caracterizar o sistema rodoviário como sistema complexo adaptativo, a partir dos seus componentes, face à sua estrutura, funcionamento e comportamento. Esta tentativa arriscada foi originada pela necessidade de avaliar a possibilidade do SR poder ser submetido à metodologia específica das ciências da complexidade, que se destina a tratar cientificamente sistemas complexos, e do facto de não ter encontrado bibliografia que estabelecesse esta relação.

Assim, pelo resultado da matriz os factores via e veículo parecem poder considerar-se sistemas complicados. Por que se tratam de sistemas compostos por várias partes, em que as suas relações e o seu comportamento são identificáveis, previsíveis e enumeráveis (Snowden, 2003). Desta forma, as causas e os efeitos podem ser separados, compreendendo as ligações e os resultados. O sistema pode ser melhorado pela optimização das partes, uma vez que o todo não é mais nem menos que o somatório das suas partes. (Heylighen, 1988). Por outro lado, resulta da mesma matriz que o factor ambiente parece ser um sistema complexo e o factor humano parece poder considerar-se um sistema complexo adaptativo.

Deste modo, parece poder-se classificar o sistema rodoviário no seu todo como um sistema complexo adaptativo, dado que este só funciona pela acção do factor humano, o qual integra inequivocamente um sistema complexo adaptativo.

Todavia, alguns dos atributos do sistema rodoviário inscritos no quadro não foram ainda suficientemente descritos, ao longo do capítulo, designadamente, as propriedades de adaptação, evolução, auto-organização e emergência, o que vou fazer seguidamente, correndo novos riscos.

5.4.1 Adaptação, evolução e auto-organização do sistema rodoviário

O sistema rodoviário resultou da criatividade humana. Dito de outra maneira, o elemento humano criou o sistema rodoviário para rentabilizar a escassez do tempo, percorrendo mais espaço, ou seja, dominou as leis da física para ultrapassar as limitações individuais de locomoção. Por outro lado, tratando-se de um sistema que implica a partilha humana de um espaço comum regulou o modo de utilização social desse espaço.

Considerando tratar-se o elemento humano de um ser inteligente, como o sabemos, este aprende com a sua experiência e adapta-se ao sistema e adapta o sistema às suas necessidades. Assim, o sistema rodoviário não é um sistema estático, este evoluiu no tempo de acordo com as necessidades humanas de adaptação, tornando-o cada vez mais ergonómico. Daí que, desde as velhas calçadas romanas, para a circulação de veículos puxados pela força de tracção animal, até às auto-estradas da actualidade, para a circulação de veículos autopropulsionados, houve uma enorme mudança, resultante da capacidade de evolução e de adaptação do utilizador ao meio e do meio ao utilizador. Outro indicador importante prende-se com a regulamentação social de utilização partilhada do espaço rodoviário que evolui continuamente de acordo com as necessidades de melhorar a adaptação social humana, naquele espaço, tornando-o auto-organizado.

Todavia, observado o sistema rodoviário numa perspectiva micro, relacionada com o seu funcionamento, pode dizer-se que é um sistema adaptativo, dado que os actores rodoviários adaptam o seu comportamento às condições ambientais. Porém, não se pode dizer que estes evoluam e que funcionem de modo auto-organizado, já que o sistema funciona de acordo com as regras implementadas.

5.4.2 Propriedades de emergência do sistema rodoviário

As propriedades de emergência de um sistema, como se já discutii, ocorrem quando o todo é mais do que a soma das partes (Morin, 1977). Seguindo o exemplo de Baranger (1999), “*o corpo humano é capaz de caminhar. Esta é uma propriedade emergente. Contudo, estudando-se somente a cabeça, somente o tronco ou somente os membros de uma pessoa,*

não haverá a compreensão da capacidade de caminhar.” Neste sentido, desde logo, o trânsito e a mobilidade conseguidos pelo sistema rodoviário são propriedades emergentes.

Voltando a Morin, *“o todo é mais que a soma das partes: o sistema possui algo mais do que seus componentes considerados de modo isolado – a sua organização, a própria unidade global, as qualidades e propriedades novas que emergem da organização e da unidade global. Esses três termos são entrelaçados e difíceis de separar”*. De igual modo, o sistema rodoviário só funciona como unidade global e pela interação permanente e entrelaçada de todos os factores que o compõem obtendo uma propriedade emergente que se prende com o trânsito e a mobilidade. Deste modo, o sistema rodoviário deveria funcionar sempre sem limitações. Porém, a *mobilidade* e o *trânsito* conseguidos, por vezes, são interrompidos sem motivo aparente, é disso exemplo, o *“efeito de harmónica”* em auto-estradas. Este efeito consiste em colunas de veículos que, devido à intensidade de tráfego, ora num instante estão a circular a uma velocidade elevada, ora no instante seguinte estão quase a parar, repetindo-se este efeito em ciclos contínuos. Podendo considerar-se este efeito como um conflito rodoviário. Outro conflito rodoviário ou efeito que interrompe a mobilidade e o trânsito é o tempo de espera que se gera nas filas. Faltando saber se estes acontecimentos se tratam ou não de uma propriedades emergentes. Certo é que, em dias diferentes, nos mesmos locais, os tempos de espera umas vezes são menores e outras maiores. Por exemplo, quando chove costumam ser maiores, embora, aparentemente, nada o justifique.

Segundo Axelrod (1997) as propriedades de emergência *“são propriedades de grande escala ou noutro sentido efeitos globais que resultam de um elevado número de agentes em interacção, que funcionam de forma independente e obedecem a regras locais simples... de acordo com esse ponto de vista, a liquidez da água é uma propriedade emergente da interacção das moléculas da água e, analogamente, a mente é uma propriedade emergente da interacção dos neurónios.”* Deste modo, num nível diferente de complexidade, comparativamente com o referido no parágrafo anterior, também o funcionamento do sistema rodoviário, resulta da interacção de um elevado número de agentes, os condutores e os peões, que obedecem a regras simples, assim gerando a sua mobilidade. Porém, nem sempre todos os agentes possuem o mesmo comportamento, sendo que nem todos obedecem da mesma maneira às regras, noutros casos, alguns não obedecem simplesmente e, ainda noutros casos, apenas alguns obedecem, e com o seu comportamento, por vezes, interrompem completamente a mobilidade que deveria ser conseguida pelo sistema. Estou a referir-me, concretamente, aos conflitos rodoviários resultantes de acidentes de viação. A obediência ou

não a estas regras simples poderá depender da *cultura* vigente, sendo que esta é, inequivocamente, uma propriedade emergente da sociedade. Como exemplo aparentemente diferenciador de *culturas rodoviárias vigentes* pode referir-se que a condução no interior das cidades parece ser mais agressiva do que nas deslocações interurbanas ou nas zonas rurais.

Assim, face ao enquadramento feito, sobre as propriedades de emergência e os diferentes efeitos (ou conflitos) que interrompem a mobilidade rodoviária, suscitam-se várias questões, sobre: Se os efeitos de harmónica e dos tempos de espera, que interrompem a propriedade emergente da mobilidade, são ou não considerados também propriedades emergentes do sistema rodoviário? No caso concreto da interrupção da mobilidade por motivo de acidente, se esta se pode ou não considerar uma propriedade emergente? Consequentemente, se o próprio fenómeno da sinistralidade rodoviária é ou não uma propriedade emergente do sistema ou se é apenas uma falha do sistema? Que outras propriedades de emergência poderão resultar do sistema rodoviário, para além da mobilidade, e que ainda não foram identificadas?

Este conjunto de questões ficam em aberto, por que não encontrei respostas para elas! Mas suscitaram-me uma outra questão: Poderão as simulações computacionais responder a estas questões? Esta questão fica também em aberto até ao teste experimental que se realizará mais adiante.

5.5 Conclusões

Neste capítulo procedi à caracterização do sistema rodoviário a partir das suas partes, os elementos que as constituem e o seu modo de interacção, a partir do processo individual de condução e da interacção colectiva de vários actores rodoviários, originando deste modo a mobilidade e o trânsito.

Caracterizei também o conflito rodoviário, as suas causas humanas e a dificuldade dos métodos científicos tradicionais em tratar o problema pelo estudo isolado das suas partes, dado tratar-se de um fenómeno que resulta de um processo estocástico e não determinístico.

Por fim, estabeleci a relação de comparação entre os diferentes subsistemas do sistema rodoviário com as propriedades dos diferentes tipos de sistemas, tendo concluído que o sistema rodoviário como um todo pode considerar-se um sistema complexo adaptativo. Respondendo assim afirmativamente à questão colocada no início do capítulo.

Todavia, ficou por esclarecer, para além das propriedades emergentes da mobilidade e do trânsito, se os efeitos que interrompem a mobilidade e o trânsito, como sejam os casos do

“efeito de harmónica” e as filas de espera, são também ou não propriedades de emergência, para além da dúvida sobre se existem ou não outras propriedades emergentes no sistema.

Face ao concluído, a questão a colocar agora, para iniciar um processo de estudo do fenómeno do conflito rodoviário e das propriedades de emergência do sistema, prende-se com a forma de modelação que melhor poderá representar o sistema rodoviário. Questão esta a que procurarei dar resposta no próximo capítulo.

“A crash is not an accident; it is not a chance event; it is not an act of God.” (Martin Perscheid)

Capítulo 6

MODELAÇÃO DO SISTEMA RODOVIÁRIO

Neste capítulo vou propor uma forma de modelação do sistema rodoviário, tendo por objectivo a simulação computacional do sistema rodoviário. A modelação depende sempre da perspectiva, da experiência e da sensibilidade do observador. Assim, a modelação proposta é exactamente fruto da minha perspectiva de observação do sistema rodoviário. Em todo o caso, para melhor sintonizar o leitor, devo referir que esta proposta, embora se centre na modelação das variáveis de estado elementares dos subsistemas do sistema rodoviário, pretende satisfazer a necessidades de futuros programadores de simulações desta natureza com fins de saúde pública.

6 Modelação do sistema rodoviário

Modelar significa simplificar e generalizar a realidade (Meadows e al., 1982). A modelação baseada em agentes (MBA) é considerada a terceira via de fazer ciência. Tal como a dedução, esta parte de uma série de conceitos. Mas de forma diferente da dedução, esta não prova teoremas. Em vez disso, um MBA gera dados simulados que podem ser analisados indutivamente. Todavia, ao invés da indução, os dados simulados resultam de uma rigorosa especificação de regras através das quais se mede o mundo real. Enquanto a proposta da indução visa encontrar padrões e a dedução visa encontrar a consequência dos conceitos, a proposta da MBA consiste em despertar a intuição. (Axelrod, 1997)

Por outro lado, conforme refere Morin (1977), a modelação depende do conhecimento e da experiência do observador. No meu caso concreto o conhecimento e a experiência sobre o fenómeno da sinistralidade rodoviária deve-se ao desempenho das minhas funções, primeiro como quadro médio, de uma força de segurança, responsável pela segurança rodoviária no distrito de Bragança, durante 11 anos, e a segunda experiência, como quadro superior, da mesma força de segurança, responsável pela coordenação da investigação das causas dos acidentes de viação de que resultam vítimas em todo o território continental, durante 5 anos. Para além destas experiências tenho realizado alguns estudos sobre as causas da sinistralidade em Portugal. As experiências e estudos referidos permitem-me especular sobre as metodologias de estudo e de controlo do fenómeno da sinistralidade e os resultados obtidos, que apesar dos sucessos conseguidos o número de acidentes e de vítimas continuam significativamente elevados. Ou seja, os condutores continuam a ter acidentes sem aceitarem

o resultado das suas acções. Daí que este novo método de fazer ciência se afigura com possuir um elevado potencial que poderá permitir abrir novas janelas de observação do fenómeno.

6.1 Modelo teórico seguido

Segundo Schilperoord (2004), a modelação é o processo de construção e de utilização de um modelo (Jim Doran e Nigel Gilbert, 1994) afirmam que a modelação surge quando existem dificuldades de acesso directo ou de observação directa da realidade e exemplificam do seguinte modo: “Sendo necessário obter conhecimento sobre uma entidade alvo T, se T não for de fácil estudo directo, torna-se necessário proceder indirectamente. Assim, em vez de T, estuda-se outra entidade M, o modelo, o qual deverá ser suficientemente semelhante ao T, de tal modo que tenhamos a confiança de que o aprendido sobre M também seja verdade para o T.

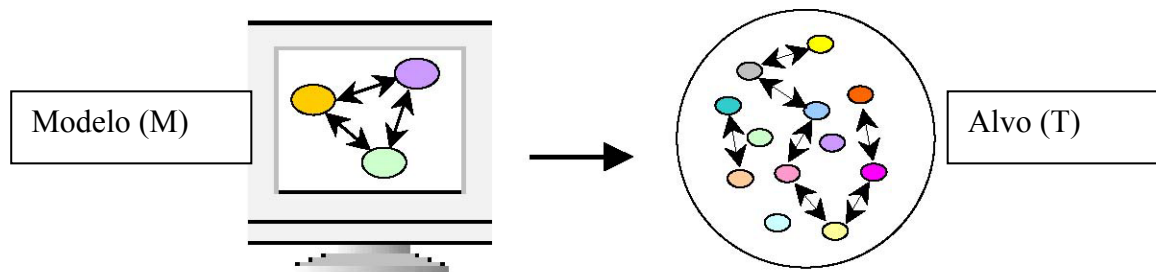


Figura 6.1 – Representação da relação entre o modelo e o alvo (Doran e Gilbert, 1994).

6.2 Modelação do sistema rodoviário

A modelação que se vai apresentar parte da observação *macro* das *entidades de alto de nível* do sistema rodoviário, ou seja, as suas propriedades emergentes, designadamente, a *mobilidade individual* e o *trânsito colectivo*, e também os efeitos resultantes do conflito entre aquelas entidades, a saber o acidente de viação. A partir daquelas entidades são identificadas as *entidades de baixo nível*, ou seja, os factores via, veículo, ambiente e humano, para seguidamente, se identificarem as *variáveis de estado elementares* que compõem aqueles factores de *nível micro*. As variáveis de estado serão identificadas pelas redes de interacção entre si e com as entidades de alto nível e serão caracterizadas pelos seus atributos e valores escalares de origem científica, técnica e empírica conhecidos, seguindo a metodologia esquematizada na figura 6.2.

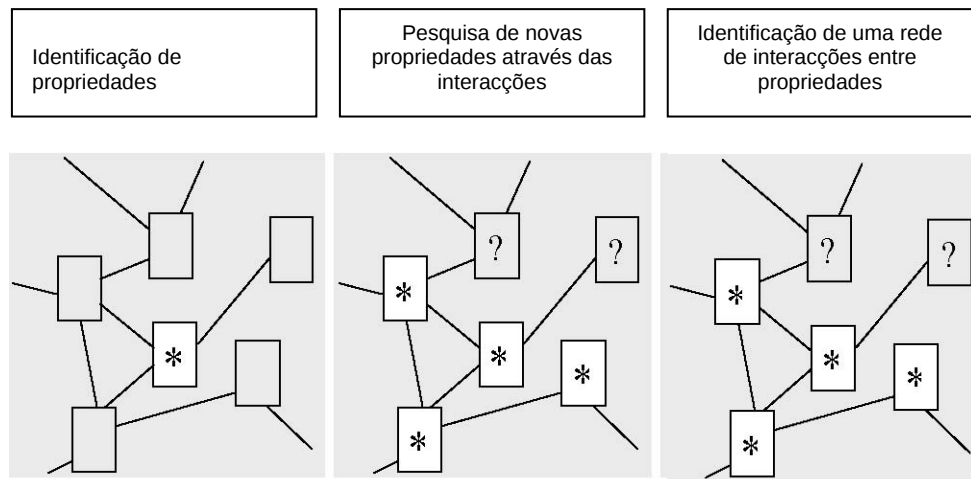


Figura 6.2 – Representação da metodologia de modelação (Schilperoord, 2004).

Posteriormente, as simulações computacionais, multi-agente, serão construídas a partir das entidades de baixo nível, através de *agentes* modelados com os atributos e valores escalares destas, com um fim de gerar *mundos virtuais* ou *cenários virtuais* que permitam, pela interacção dos *agentes*, observar a realidade, ao *nível macro*, e manipulá-la utilizando os valores escalares, de modo a possibilitar uma observação holística do fenómeno.

Como ponto de partida para a modelação, apresento na figura seguinte, as entidades de baixo nível e as variáveis de estado principais do sistema na perspectiva do conflito rodoviário.

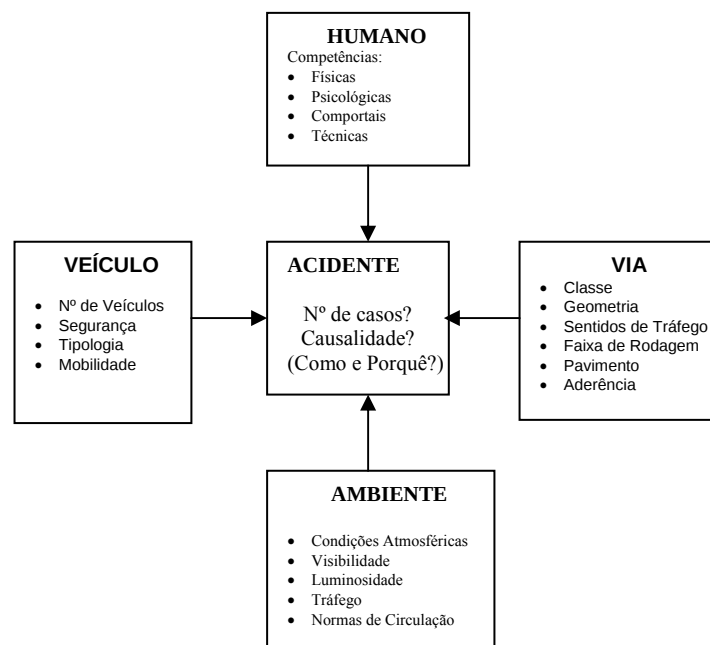


Figura 6.3 – Modelo do sistema na perspectiva do conflito rodoviário.

O objectivo deste modelo visa fazer uma representação sintética do sistema rodoviário, com vista à sua posterior simulação computacional.

Deste modo, vou começar por modelar o factor via, seguido dos factores ambiente, veículo e humano, pela mesma ordem.

6.2.1 Factor via

A via constitui-se num subsistema do sistema rodoviário, que se poderá considerar complicado. A via é fruto da tecnologia humana. Esta consiste num meio de comunicação terrestre destinada ao trânsito rodoviário. Quando aqui se utiliza o termo Via, pretende-se referir a Via Pública (VP), ou seja, uma via de comunicação terrestre afecta ao trânsito público, como a conceptualiza o Código da Estrada Português (CE). Existem várias formas de vias (classes), de acordo com os atributos, que as diferenciam, como sendo: a classe, a geometria, os sentidos de trânsito, as intersecções e os pavimentos, conforme se conceptualiza no Glossário constante do Apêndice I.

Para efeitos desta modelação consideram-se apenas as características diferenciadoras principais (LNEC, 2005).

5.2.1.1 Classes de vias

Interurbanas

- Auto-estradas (AE), são estradas interurbanas com faixas separadas, com acessos condicionados e nós desnivelados, e cujo limite de velocidade máxima legal é de 120 km/h;
- Estradas interurbanas de faixa única, com duas vias e acessos condicionados, cujo limite geral de velocidade máxima legal é, consoante os casos, de 100 km/h ou de 90 km/h. Esta tipificação corresponde às Vias Reservadas (VR) a veículos automóveis;
- Estradas interurbanas de faixa única, com duas vias e acessos não condicionados, cujo limite geral de velocidade é de 90 km/h. Esta tipificação corresponde, genericamente, às Estradas Nacionais, Regionais e Municipais (EN, ER e EM, respectivamente).

Meio peri-urbano ou urbano disperso

Consideram-se duas classes de estradas em meio peri-urbano ou urbano disperso:

- Estradas interurbanas de faixa única e duas vias, no atravessamento de povoações, com limite de velocidade máxima legal igual a 50 km/h;
- Estradas de faixa única, multivias, em meio semi-urbano, com limites de velocidades máximas legais entre 60 e 80 km/h.

Meio urbano (arruamentos)

As vias em zona urbana consolidada são divididas em quatro classes:

- Vias urbanas de Nível I, que correspondem a auto-estradas ou vias rápidas urbanas, com limites de velocidade máxima entre 80 e 120 km/h;
- Vias urbanas de Nível II, correspondendo a arruamentos estruturantes da rede urbana, com funções distribuidora e colectora, com reduzida influência dos fluxos marginais de peões no funcionamento do tráfego motorizado e cujo limite de velocidades é igual a 50 km/h;
- Vias urbanas de Nível III, correspondendo a arruamentos com funções simultaneamente de acesso e colectoras ou distribuidoras, com limite de velocidade igual a 50 km/h;
- Vias urbanas de Nível IV, correspondendo aos arruamentos em zona residencial, com funções de acessibilidade e de fruição do espaço público, com limite de velocidade máxima igual ou inferior a 50 km/h.

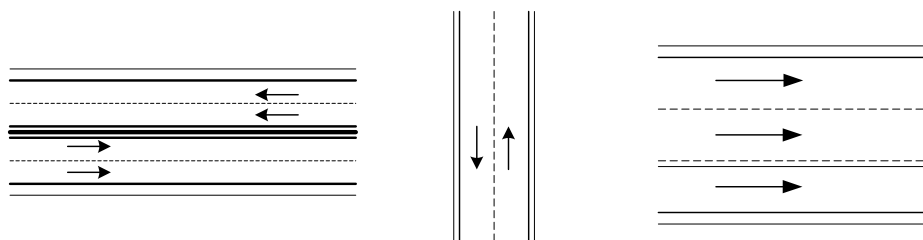


Figura 6.4 - Representação genérica das classes de vias.

5.2.1.2 Geometria da via

As vias rodoviárias podem possuir vários tipos de traçado (configuração geometria), como sendo:

- Rectas - traçados de via em linha recta;
- Curvas – traçados de via em curva, com diferentes raios de curvatura;
- Declive - inclinação do traçado da via ascendente ou descendente; e
- Lomba ou depressão – troço da via com uma curta elevação ou depressão.

5.2.1.3 Intersecções da via

As vias são itinerários de ligação, pelo que se interceptam mutuamente, criando nós de ligação. Assim, os tipos de intersecção mais frequentes são:

- **Cruzamento** – Intersecção de vias em forma de cruz;
- **Entroncamento** – Intersecção de vias em forma de “T” ou “Y”;
- **Rotunda** – Intersecção de duas ou mais vias através de uma circular;
- **Passagem de nível** - Intersecção de uma via rodoviária com uma via ferroviária; e
- **Nós** – Intersecção típica das AE com outras vias. Os nós distinguem-se também pelo facto de possuírem, normalmente, uma via de aceleração e outra de desaceleração, no acesso ao patamar da AE e na sua saída, respectivamente.

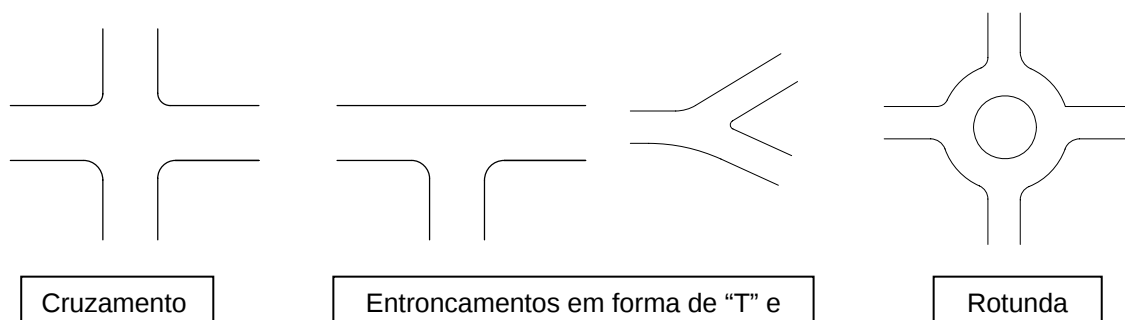


Figura 6.5 - Representação do tipo de intersecção de vias.

5.2.1.4 Faixa de rodagem

Segundo Cardoso (1999), o dimensionamento genérico das vias de circulação, nomeadamente no que se refere às cêrceas máximas, está relacionado com as dimensões físicas (largura e altura) dos veículos (a), da respectiva área de varredura (b), a possibilidade de movimentos verticais e laterais durante a circulação (c), as distâncias de segurança entre tráfegos com sentidos opostos ($d1$) e as distâncias de segurança entre o veículo e o exterior da estrada ($d2$).

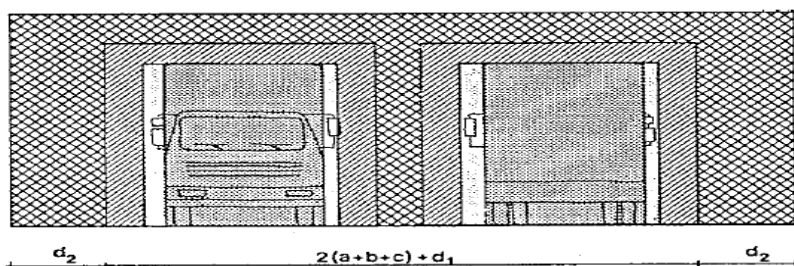


Figura 6.6 – Largura máxima da faixa de rodagem. (Cardoso, 1999)

Para movimentos laterais pode ser usado um valor corrente de $c=0,3\text{ m}$ (para cada lado do veículo) e para os movimentos verticais o valor de $c=0,2\text{ m}$. Relativamente à distância de segurança na vertical, pode ser usado o valor de $d=0,3\text{ m}$ ($a+b+c+d=4,50\text{ m}$). Relativamente à distância de segurança lateral, são correntes os valores de $0,25\text{ m}$ para $d1$ e de $1,25\text{ m}$ para $d2$.

Assim, conclui-se que a largura máxima de uma via deverá ser de $4,5$ metros.

5.2.1.5 Pavimentos

Os pavimentos das vias podem também ser de diferentes naturezas:

- **Asfalto** – Uma mistura de pedra moída (brita) com alcatrão;
- **Betão** – Uma mistura de areia com cimento;
- **Gravilha** – Pedra moída solta ou compactada;
- **Metal** – Grelha metálica, utilizada normalmente em pontes;
- **Pedra** – Pedra compactada ou calçada.

Todavia, face às condições atmosféricas os pavimentos podem perder as suas características naturais pela queda de chuva e de neve ou pela formação de gelo, que alteram significativamente as condições de aderência (atrito).

5.2.1.6 Aderência

A aderência consiste na capacidade de resistência dos pavimentos ao movimento das rodas dos veículos. Esta é uma característica extraordinariamente importante dos pavimentos para a realização das travagens. Ou seja, quanto maior for o coeficiente de atrito de um pavimento maior é a eficácia da travagem do veículo.

O coeficiente de atrito é uma medida da resistência ao movimento mobilizada na interface pneu-superfície do pavimento, sendo expresso pelo quociente entre a força vertical que o pneu transmite ao pavimento e a força horizontal de resistência ao movimento (Cardoso, 1999).

Segundo Cardoso (1999), uma investigação quantitativa (Kleer, A. e al.) mostra que, em módulo, o atrito (F_a) é aproximada e directamente proporcional à força normal de reacção N . Numa superfície nivelada, a reacção normal é igual ao peso (P) de um objecto. A razão entre o atrito e a normal é constante e depende somente da natureza das superfícies de contacto. Essa constante é chamada de coeficiente de atrito (μ), isto é,

$$\mu = \frac{F_a}{N} \text{ ou } F_a = \mu N \quad (1)$$

O Atrito dos pneus com o pavimento

Para desacelerar ou parar um veículo automóvel acciona-se o sistema de travagem. Numa travagem de emergência, tendemos a aplicar os freios fortemente. Para sistemas convencionais (não ABS), as rodas ficam bloqueadas e impedidas de girar. Como resultado, o carro derrapa e desacelera. A força de desaceleração é, na verdade, o atrito de escorregamento. Numa estrada nivelada, essa força é igual ao produto do coeficiente de atrito (μ) dos pneus com a estrada e o peso ($m \cdot g$) do carro, isto é,

$$F = \mu \cdot m \cdot g \quad (2)$$

onde (m) é a massa do carro e (g) é a aceleração devida à gravidade.

Face à importância desta característica dos pavimentos foi criado um quadro de coeficientes de atrito para os diferentes tipos de pavimento, a qual toma também em conta a influência das condições atmosféricas.

Quadro 6.2 - Coeficientes de atrito de referência face aos tipos de pavimento.

POSSÍVEIS VALORES DOS FACTORES DE ATRITO - Pavimentos (Borrel, 1991)							
Descrição da superfície da via Velocidades	Seca				Húmida		
	Menos de 50 km/h		Mais de 50km/h		Menos de 50 km/h		Mais de 50 km/h
Betão							
Novo e liso	0,80	1,20	0,70	1,00	0,50	0,80	0,40 0,75
Usado	0,60	0,80	0,60	0,75	0,45	0,70	0,45 0,65
Polido pelo trânsito	0,55	0,75	0,50	0,65	0,45	0,65	0,45 0,60
Asfalto ou alcatrão							
Novo e liso	0,80	1,20	0,65	1,00	0,50	0,80	0,45 0,75
Usado	0,60	0,80	0,55	0,70	0,45	0,70	0,40 0,65
Polido pelo trânsito	0,55	0,75	0,45	0,65	0,45	0,65	0,40 0,60
Com excesso de alcatrão	0,50	0,60	0,35	0,60	0,30	0,60	0,25 0,55
Pedra compactada							
Nova e lisa	0,75	1,00	0,70	0,90	0,65	0,90	0,60 0,85
Polida pelo trânsito	0,50	0,70	0,45	0,65	0,30	0,50	0,25 0,50
Gravilha							
Compactada	0,55	0,85	0,50	0,80	0,40	0,80	0,40 0,60
Solta	0,40	0,70	0,40	0,70	0,45	0,75	0,45 0,75
Pedra							
Calçada	0,55	0,75	0,55	0,75	0,55	0,75	0,55 0,75
Grelha metálica							
Com ranhuras	0,70	0,90	0,35	0,75	0,25	0,45	0,20 0,35
Neve							
Compactada	0,30	0,55	0,35	0,55	0,30	0,60	0,30 0,60
Solta	0,10	0,25	0,10	0,20	0,30	0,60	0,30 0,60
Gelo							
Liso	0,10	0,25	0,07	0,20	0,05	0,10	0,05 0,10

O factor de atrito actual ou coeficiente de fricção de um pavimento determinado pode também variar consideravelmente devido a uma série de factores, tais como a superfície da estrada, as

várias passagens dos veículos, a pressão dos pneus, o desenho dos mesmos, a temperatura do ar, a velocidade e o declive da via (RRL, 1963).

Correcção do coeficiente de atrito pelo declive

O declive da via realiza uma grande influência no coeficiente de atrito, pelo que este deverá ser corrigido pela determinação da percentagem de inclinação do traçado. Para a determinação da elevação ou inclinação de um determinado pavimento, pode ser usado o procedimento esquematizado na Figura seguinte.

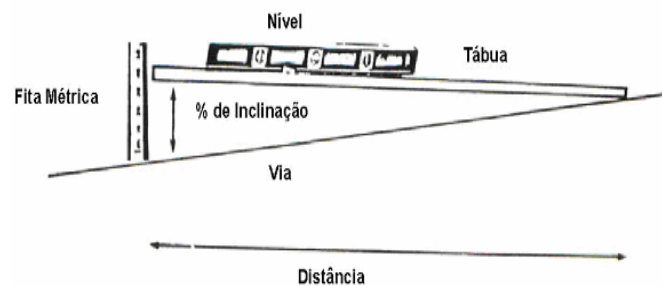


Figura 6.7 – Determinação do declive do pavimento.

A figura acima mostra que a determinação da elevação do pavimento pode ser feita utilizando uma fita métrica, um nível e uma tábua. A elevação ou inclinação do pavimento em percentagem é então calculada a partir da seguinte expressão:

$$e = \frac{h}{D} \times 100 \text{ [\%]} \quad (3)$$

Onde (e) representa o declive do pavimento, (h) a altura e (D) o comprimento do espaço medido (distância).

Calculado o declive, o valor do coeficiente de atrito (μ) é corrigido (μ') somando-lhe ou subtraindo-lhe o valor do declive, conforme seja um declive ascendente ou descendente, respectivamente.

$$\mu' = \mu \pm e \quad (4)$$

5.2.1.7 Resumo

O modelo do factor via, com vista à sua simulação computacional, poderá ser composto pelas seguintes partes elementares, variáveis de baixo nível, e respectivos atributos e valores escalares.

Quadro 6.3 – Resumo das variáveis, atributos e valores escalares do factor via.

Variáveis	Atributos	Escalas	Obs.
Classe de via	Auto-estrada		
	Inter-urbana		
	Urbana	-----	
Geometria da Via	Recta		
	Curva	-----	
	Lomba		
Faixa de Rodagem	Número de vias	1, 2, 3, ...	
	Largura de cada via	3 m	
	Sentidos	1 - 2	
Pavimento	Asfalto		
	Betão		
	Pedra	-----	
	Gravilha		
	Grelha Metálica		
Intersecções	Cruzamento		
	Entroncamento	-----	
	Rotunda		
Aderência	Passagem de Nível		
	Coefficiente de Atrito	0,1 a 1,2	(Ver Quadro 6.2)

Qualquer simulação da via deverá conter todas as variáveis de estado e os atributos aplicáveis a cada caso concreto, dependendo do cenário pretendido.

6.2.2 Ambiente

O factor ambiente constitui-se como um subsistema complexo do sistema rodoviário e pode caracterizar-se por diferentes variáveis de estado, como sendo as condições meteorológicas, as condições de visibilidade e de luminosidade, o tráfego ou outras menos tangíveis como são as normas de circulação rodoviária.

5.2.2.1 Condições meteorológicas

As condições meteorológicas caracterizam-se pelos seguintes atributos:

- O tempo seco, a queda de chuva, a queda de neve, formação de nevoeiro e de gelo.

As condições atmosféricas alteram significativamente a circulação rodoviária, designadamente, a visibilidade do condutor e a aderência da via, influenciando assim a segurança da circulação.

5.2.2.2 Luminosidade

A luminosidade está relacionada com os seguintes factos:

- o dia; a noite; o crepúsculo matutino; e o crepúsculo vespertino.

5.2.2.3 Visibilidade

A visibilidade pode caracterizar-se pelos seguintes atributos:

- Uma visibilidade plena de um dia claro;
- A visibilidade diminuída pelo nevoeiro;
- A queda de chuva intensa;
- A existência de grande quantidade de poeiras no ar.

Alguns dos atributos aqui referidos embora pertençam à variável das condições meteorológicas a sua influência exerce-se na visibilidade ambiental.

A distância de visibilidade é muito importante para a realização atempada das manobras de condução do veículo, pelo que se citam alguns conceitos técnicos. Nos projectos de vias rodoviárias, as distâncias de visibilidade são referidas a uma determinada acção: distância de visibilidade de travagem, de ultrapassagem ou de decisão.

- **Distância de acção** – É o comprimento de estrada necessário para que o condutor possa efectuar determinada acção.
- **Distância de visibilidade** – É a extensão contínua de estrada visível para o condutor.
- **Distância de visibilidade de paragem (DVP)** – É a mínima distância de visibilidade necessária para que um condutor possa parar o seu veículo, contada a partir do local onde lhe é fisicamente possível detectar o obstáculo.
- **Distância de visibilidade de ultrapassagem (DVU)** – É a mínima distância necessária para que o condutor de um veículo que efectue uma ultrapassagem possa concluir esta manobra com segurança, no caso de surgir um veículo em sentido contrário após o início da manobra.

Quadro 6.4 - Valores de DVP e de DVU recomendados para as estradas da Rede Rodoviária Nacional (JAE, 1994) e dos EUA (AASHTO, 1984).

Velocidade base (km/h)	DVP (m)		DVU (m)	
	EUA	Portugal	EUA	Portugal
40	45	40	285	280
48	60	60	330	350
64	83 - 98	90	450	455
80	120 - 143	120	540	560
96	158 - 195	165	630	665

- **Distância de visibilidade de decisão (DVD)** – É a mínima distância de visibilidade necessária para que o condutor de um veículo possa tomar uma decisão relativamente à manobra a executar, quando confrontado (em locais complexos) com situações de emergência, contada a partir do local onde lhe é fisicamente possível detectar a situação. É composta por três parcelas: uma correspondente à distancia percorrida durante o tempo de detecção e reconhecimento; outra correspondente à distância percorrida durante o tempo de decisão e resposta; finalmente, a distância percorrida no intervalo de tempo necessário à execução da manobra seleccionada.

Quadro 6.5 - Valores recomendados nas normas americanas e para as estradas da Rede Rodoviária Nacional (JAE, 1994) e dos EUA (AASHTO, 1984).

Velocidade base (km/h)	Tempo (s)			DVD (m)	
	Deteccção e reconhecimento	Decisão e resposta	Manobra	EUA	Portugal
40	-	-	-	-	200
48	1,5 – 3,0	4,2 – 6,5	4,5	135-185	200
64	1,5 – 3,0	4,2 – 6,5	4,5	180 -245	200
80	1,5 – 3,0	4,2 – 6,5	4,5	225 - 310	270
96	2,0 – 3,0	4,7 – 7,0	4,5	296 - 385	315

- **Distância de visibilidade em cruzamento** – É a mínima distância, segundo o alinhamento da estrada (arruamento) principal de um cruzamento, necessária para que o condutor de um veículo na estrada secundária possa efectuar a manobra de atravessamento ou de entrada na estrada principal. Esta distância (I_p) é contada ao longo da estrada principal, para cada lado do cruzamento, a partir das extremidades esquerda e direita da estrada secundária.

Quadro 6.6 - Distâncias de visibilidade em cruzamento previstas nas normas da JAE.

Velocidade Base (km/h)	Tipo de Estrada Atravessada	
	Faixa Única	Faixa Dupla
40	145	170
50	185	210
60	220	250
70	255	300
80	290	340

A composição das distâncias de visibilidade em cruzamento (para cada lado da estrada principal) com a distância de observação, dá origem a um **triângulo mínimo de visibilidade**, o qual define uma área dentro da qual não deve existir qualquer obstáculo à visão, incluindo dispositivos de sinalização vertical ou veículos estacionados.

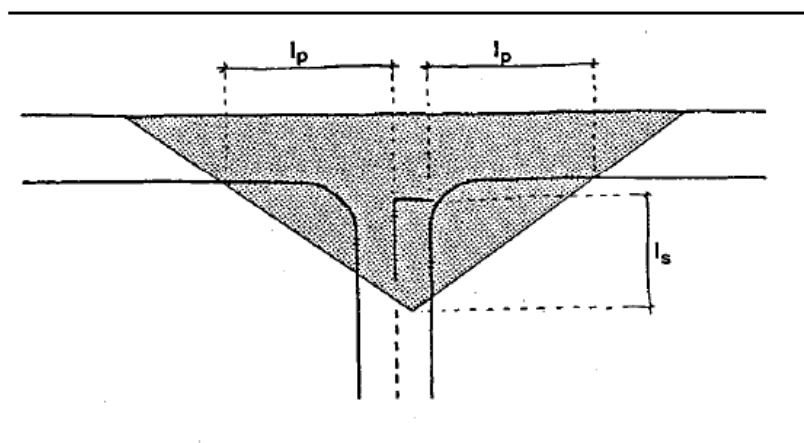


Figura 6.8 – Triângulo de visibilidade em cruzamentos (ERSF, 1996).

- **Visibilidade de circulação** - Por outro lado, o CE (Artº 60º) português prevê que os veículos automóveis deverão estar equipados com um dispositivo de iluminação frontal, manipulado por um comutador, em que a luz máxima deve iluminar a via para a frente do veículo numa distância não inferior a 100 metros e, a luz média (de cruzamento com outros veículos) deve iluminar a via para a frente do veículo numa distância até 30 metros.

Assim, procurando parametrizar os valores máximos e mínimos da distância de visibilidade, no acto da condução, para efeitos de simulação computacional, vou considerar:

- **Durante o dia:** a distância máxima de visibilidade de 315 metros (DVD);
- **Durante a noite:** a distância máxima de 100 metros e mínima de 30 metros, correspondentes à extensão máxima e mínima da iluminação própria do veículo.

5.2.2.4 Tráfego rodoviário

Esta categoria pode ser medida de vários modos, designadamente, pelas seguintes variáveis, de acordo com o Manual de Trânsito da GNR:

- **Densidade de tráfego** - Número de veículos que, num dado instante, ocupa a unidade de comprimento de uma via de tráfego. Exprime-se, geralmente em veículos por quilómetros.
- **Tráfego médio diário (TMD)** - Volume médio de tráfego durante 24 horas. Obtém-se somando várias contagens diárias e dividindo o seu total pelo número de dias;
- **Corrente de tráfego** - Conjunto de veículos que transitem no mesmo sentido, em uma ou várias filas contínuas.
- **Volume de tráfego** - Número de veículos que passam numa dada secção da via durante um período determinado.
- **Capacidade de tráfego** - Número de veículos que por unidade de tempo pode passar numa dada secção da via em certas condições.

5.2.2.5 Normas de circulação rodoviária

As normas de circulação rodoviária, que se consideram mais importantes para efeitos de segurança rodoviária, são as que constam do Código da Estrada (CE). Assim, o CE contempla normas de diversas naturezas, que pela sua elevada quantidade não se podem aqui reproduzir, sendo para o efeito necessário a consulta do documento, bastando para esta modelação referir apenas as características gerais das normas, que se dividem em:

Regras e sinais de mobilidade

- De obrigação – que obrigam à adopção de determinadas acções de segurança. Referem-se como exemplos as regras que obrigam a dar prioridade de circulação aos veículos que se apresentam pela direita e a obrigação de parar ao sinal vermelho.
- De proibição – que proíbem acções incompatíveis com a segurança. Cita-se como exemplo a proibição de circular a uma velocidade superior a 50 km/ dentro das localidades.
- De informação – que orientam a circulação rodoviária com segurança.

Pela sua importância, devo identificar as regras e os sinais, contemplados pelo CE, que maior influência poderão exercer na segurança rodoviária, pelo facto de gerirem a interacção entre os condutores, a partir dos seus interesses de mobilidade, de onde resultam, normalmente, os maiores conflitos rodoviários:

- **A velocidade** - Os limites gerais de velocidade máxima legal (Nº 1, do Artº 27º, do CE):

	Dentro das localidades	Auto-estradas	Vias reservadas a automóveis e motociclos	Restantes vias públicas
Ciclomotores e Quadriciclos	40	--	--	45
Motociclos:				
<i>De cilindrada superior a 50 cm³ e sem carro lateral</i>	50	120	100	90
<i>Com carro lateral ou com reboque</i>	50	100	80	70
<i>De cilindrada não superior a 50 cm³</i>	40	--	--	60
Triciclos	50	100	90	80
Automóveis ligeiros de passageiros e mistos:				
<i>Sem reboque</i>	50	120	100	90
<i>Com reboque</i>	50	100	80	70
Automóveis ligeiros de mercadorias:				
<i>Sem reboque</i>	50	110	90	80
<i>Com reboque</i>	50	90	80	70
Automóveis pesados de passageiros:				
<i>Sem reboque</i>	50	100	90	80
<i>Com reboque</i>	50	90	90	70
Automóveis pesados de mercadorias:				
<i>Sem reboque ou com semi-reboque</i>	50	90	80	80
<i>Com reboque</i>	40	80	70	70
Tractores agrícolas ou florestais	30	--	--	40
Máquinas agrícolas, motocultivadores e tractocarros	20	--	--	20
Máquinas industriais:				
<i>Sem matrícula</i>	30	--	--	30
<i>Com matrícula</i>	40	80	70	70

Figura 6.9 – Limites de velocidade legais.

- **A prioridade de passagem** - A regra geral de prioridade em intersecções de vias (Nº 1, do Artº 30º, do CE) refere que: nos cruzamentos e entroncamentos o condutor deve ceder a passagem aos veículos que se lhe apresentem pela direita. Constituem excepções à regra geral de prioridade (Nº 1, do Artº 31º, do CE) os seguintes casos: as rotundas, a saída dos parques de estacionamento e o acesso a auto-estrada ou a via reservada, em que cede a passagem o condutor que pretender entrar na corrente de tráfego.

- **O sinal de STOP** - Sinal de paragem obrigatória em cruzamentos e entroncamentos (Artº 21º do Regulamento de Sinalização de Trânsito – RST); e

- Os **semáforos** – Existem dois tipos de sinais luminosos (Artº 69º do RST), os destinados a regularizar a circulação do trânsito de veículos e os destinados a limitar a velocidade destes. Estes sinais apresentam luzes com três cores: o verde, que autoriza a passagem; o amarelo, de transição entre o verde e o vermelho; e o vermelho de passagem proibida. Em alguns casos possuem apenas duas cores, o amarelo intermitente e o vermelho, específico dos sinais limitadores da velocidade de circulação.

Administrativas

As normas administrativas prendem-se sobretudo com a vertente sancionatória do CE e com os aspectos procedimentais de aplicação das sanções e do próprio CE.

5.2.2.6 Resumo

O modelo do factor ambiente, com vista à sua simulação computacional, poderá ser composto pelas seguintes partes elementares, variáveis de baixo nível, e respectivos atributos e valores escalares.

Quadro 6.7 – Resumo das variáveis, atributos e valores escalares do factor ambiente.

Variáveis	Atributos	Escalas	Obs.
Condições Meteorológicas	Seco		Estes atributos, por norma, influenciam o desempenho de atributos de outras variáveis.
	Chuva		
	Neve	-----	
	Gelo		
Luminosidade	Nevoeiro		
	Dia		
	Noite	-----	
	Crepúsculo		
Visibilidade	Paragem	40 – 165 m	
	Ultrapassagem	280 – 665 m	
	Decisão	200 – 315 m	
	Nocturna	30 – 100 m	
Tráfego	Densidade	Veículos por km	Depende do número de veículos em interacção.
	Médio Diário	Veículos por dia	
	Corrente	Veículos mesmo sentido	
	Volume	Capacidade da via	
Normas Rodoviárias	Velocidade legal	50 – 120 km/h	
	Prioridade	Direita	
	Sinais Luminosos	Amarelo, verde, vermelho	
	STOP	Parar sempre	

6.2.3 Veículo

O veículo automóvel representa mais um subsistema do sistema rodoviário, que em vez de um sistema complexo se pode considerar antes um sistema complicado. O veículo automóvel é fruto da tecnologia e consiste num instrumento de mobilidade rodoviário auto-propulsionado, que se pode destinar ao transporte de pessoas, de mercadorias ou misto. Para a presente modelação importa caracterizar o veículo em termos de segurança, da tipologia e da mobilidade.

5.2.3.1 Segurança activa

A segurança activa – Consiste num conjunto de elementos que exercem a sua função durante a circulação do veículo e podem ser manipulados pela vontade do condutor e cuja função essencial é evitar o acidente.

Neste grupo, poderemos incluir, entre outros, os seguintes elementos e órgãos:

- O sistema de iluminação – que iluminam o veículo e o condutor;

- O sistema de travagem – que permite ao condutor reter a marcha do veículo;
- O sistema de direcção – que permite ao condutor dirigir o veículo;
- Os espelhos retrovisores – que permitem ao condutor observar o ambiente à sua retaguarda;
- Os pneumáticos – que permitem a circulação do veículo e estabelecem a sua ligação à via;
- Outros equipamentos tecnológicos.

5.2.3.2 Segurança passiva

Segurança passiva – Consiste nos elementos que desenvolvem a sua função no momento do acidente, contribuindo para paliar as consequências do acidente, diminuindo os danos pessoais e materiais.

Neste grupo poderemos considerar, entre outros, os seguintes:

- O cinto de segurança – que prende o condutor e os passageiros ao lugar onde seguem sentados;
- O apoio da cabeça – que serve para proteger a cabeça dos ocupantes do veículo no caso de uma colisão traseira;
- O ancoradouros dos assentos – que servem para fixar os assentos ao veículo;
- O AIR-BAG – que serve para proteger os ocupantes dos veículos no caso de colidirem com a estrutura interior do próprio veículo, no caso de uma colisão frontal ou lateral;
- O sistema de retenção para crianças – que se destina a prender as crianças ao seu lugar no interior do veículo;
- O desenho interno do veículo – com superfícies arredondadas e de material flexível para absorver melhor a energia dissipada no caso de uma eventual colisão dos ocupantes com a estrutura interna do veículo;
- O capacete de protecção – para proteger a cabeça dos condutores e passageiros dos veículos de duas rodas. Etc.

5.2.3.3 Tipos de veículos

As características dos veículos são importantes para definir a largura das vias, o comprimento máximo dos trainéis (em função da inclinação), o raio e a largura de via em curvas horizontais e a dimensão das zonas de inversão de marcha.

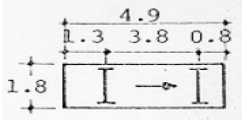
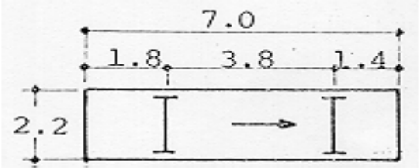
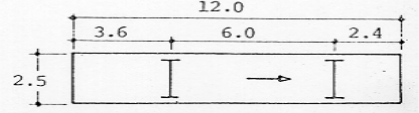
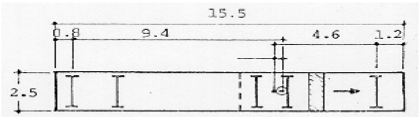
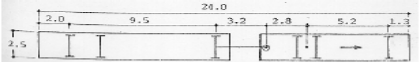
O Código da Estrada considera um elevado número de tipos de veículos, em razão da sua estrutura e funcionalidade. Porém, para a presente modelação apenas interessam as suas características diferenciadoras principais, ou seja, estruturais e dimensionais.

Assim, em termos estruturais podemos considerar apenas os veículos de quatro rodas dos seguintes tipos: ligeiros de passageiros, ligeiros de mercadorias, pesados, reboques e semi-reboques.

Em termos dimensionais, os veículos são definidos em função de uma série de medidas, de que se destacam: o comprimento, a largura, a altura e a zona de varredura. A zona de varredura corresponde ao espaço em planta ocupado pelo veículo ao movimentar-se, a que corresponde o raio mínimo de inscrição.

A altura máxima dos veículos está limitada a 4,0 metros na maioria dos países da EU. As restantes dimensões são apresentadas no quadro seguinte. (NSRA, 1973 e Campos, 1993).

Quadro 6.7 – Dimensões genéricas dos veículos.

Tipo de veículo	Raios mínimos de inscrição	Dimensões
VLP Veículo ligeiro de passageiros	Exterior: 6.0 m Interior: 3.5 m	
VLM Veículo ligeiro de mercadorias	Exterior: 7.5 m Interior: 4.5 m	
VPM Veículo pesado de mercadorias	Exterior: 12.0 m Interior: 7.0 m	
SR Semi-reboque	Exterior: 12.0 m Interior: 5.3 m	
VPR Veículo pesado com reboque	Exterior: 15.0 m Interior: 5.3 m	

5.2.3.4 Distribuição do tipo de veículos em Portugal

Em Portugal, por estranho que pareça, não existe uma base de dados fiável que contenha o número de veículos em circulação e a sua distribuição por tipologia. Os veículos são registados pela administração pública, porém, normalmente não são abatidos, pelo que mesmo

não circulando engrossam o parque automóvel do país. Espera-se que brevemente este problema seja solucionado. Apesar deste constrangimento vou apresentar os dados existentes, que se afiguraram mais fiáveis, produzidos pela Associação Automóvel de Portugal (ACAP, 2006)

Quadro 6.8 – Distribuição do tipo de veículos em Portugal.

Tipos de veículo		Quantidades
Ligeiros de passageiros		4.290.000
Ligeiros de mercadorias		1.184.000
Pesados de passageiros		15.000
Pesados de mercadorias		136.000
Veículos de duas rodas	Motociclos	157.720
	Ciclomotores	401.000
Total		6.183.720

Em Portugal, segundo os dados da ACAP, existem cerca de 6.183.720 veículos automóveis e ciclomotores, distribuídos pelos tipos ligeiros, pesados e duas rodas, o que perfaz um rácio de 2,5 pessoas por veículo ligeiro de passageiros e de 1,9 pessoas por veículo automóvel (sem contar com os ciclomotores e os motociclos).

5.2.3.5 Mobilidade

A mobilidade é a característica mais importante dos veículos automóveis, ou seja, é a característica que permite rentabilizar o espaço e o tempo através do movimento. O movimento consiste na deslocação de um objecto através do espaço a uma determinada velocidade. Embora o movimento e a velocidade estejam intimamente relacionados possuem características distintas. Enquanto a velocidade depende da aceleração e da desaceleração, produzindo maior ou menor quantidade de movimento, o movimento pode ser rectilíneo ou curvilíneo. Por outro lado, estes dois tipos de movimento podem ser uniformes ou uniformemente acelerados. Em todo o caso, no concernente ao movimento rodoviário, quer a velocidade quer o movimento dependem da acção do condutor.

O estudo da velocidade e do movimento dos objectos pertence ao campo de investigação da física. Existem vários modelos físicos e matemáticos para o estudo destes fenómenos. Neste trabalho serão descritos apenas os modelos básicos considerados mais importantes para a modelação.

O movimento

Em termos científicos o movimento é objecto de estudo de um ramo da Física que se designa por Mecânica, que por sua vez, a subdivide na cinemática e na dinâmica.

- A Cinemática estuda a descrição dos diferentes movimentos que um corpo pode realizar sem ter em conta as suas causas.
- A Dinâmica estuda o movimento dos corpos considerando as causas que o originam ou o modificam, ou seja, as forças.

Pela importância destes conceitos físicos elaborei um estudo dedicado ao movimento que coloquei no Apêndice 3 devido à sua extensão. Aqui apenas vou abordar, brevemente, os conceitos de velocidade e de aceleração e seguidamente citar um estudo, da autoria do LNEC, sobre a distribuição das velocidades praticadas nas estradas em Portugal. Este estudo é fundamental para a simulação do tráfego rodoviário.

A velocidade

A velocidade é igual ao espaço percorrido “s” por unidade de tempo “t”. Esta pode medir-se em termos médios ou instantâneos.

- A velocidade média “ v_m ” é o quociente entre a distância total percorrida “ Δs ”, desde o ponto final “ s_2 ” ao ponto inicial “ s_1 ”, e o tempo total dispendido “ Δt ”, desde o tempo final “ t_2 ” ao tempo inicial “ t_1 ” desse deslocamento.

$$v_m = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{s_2 - s_1}{t_2 - t_1} \quad (5)$$

- A velocidade instantânea é a velocidade que possui um corpo num instante determinado. Para determinar a velocidade instantânea necessitamos de conhecer a posição do corpo em cada instante. A velocidade instantânea é o limite do cociente de $\Delta s / \Delta t$ quando Δt tende para zero ($\Delta t \rightarrow 0$).

No sistema internacional a velocidade mede-se em metro por segundo (m/s) ou em quilómetro por hora (km/h).

A aceleração

A aceleração significa variar a velocidade quer aumentando-a quer diminuindo-a. Quanto maior for a variação maior será a aceleração. Logo a aceleração é a variação da velocidade por unidade de tempo.

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v_f - v_{il}}{\Delta t} \quad (6)$$

Sendo v_f a velocidade final, v_i a velocidade inicial e Δt o tempo decorrido.

Do mesmo modo que a velocidade, a aceleração também é uma magnitude vectorial. Portanto, é necessário para além do seu valor numérico, a direcção e o sentido em que se produz. Define-se como aceleração vectorial média (a_m) de um objecto como o quociente entre a variação da velocidade Δv e a variação do tempo Δt .

- A aceleração instantânea é o limite deste quociente quando Δt tende para zero ($\Delta t \rightarrow 0$).

A unidade de medida da aceleração no Sistema Internacional é m/s^2 .

Os valores adoptados para acelerações dependem simultaneamente das prestações mecânicas dos veículos, do atrito pneu-superfície do pavimento mobilizável e das exigências de conforto dos condutores.

Em veículos ligeiros de passageiros são correntes valores médios de aceleração da ordem dos $1,2 \text{ ms}^{-2}$ para uma variação da velocidade de 0 aos 80 km/h. Em situação de arranque (1ª velocidade) pode ser adoptada uma aceleração de 2 ms^{-2} . Para veículos pesados (com relação potência-peso de 10W/Kg) os valores das acelerações acima referidas são inferiores $0,4 \text{ ms}^{-2}$ e 1 ms^{-2} , respectivamente (Cardoso, 1999).

Estudo das velocidades praticadas nas estradas portuguesas

O estudo sobre as velocidades praticadas pelos condutores nas estradas portuguesas foi efectuado pelo LNEC no ano de 2004 (Cardoso, 2006). O estudo foi feito nas estradas do território continental, em 40 locais distintos, compreendendo todo o tipo de vias. As medições foram feitas em troços rectos durante 96 horas, sendo que dois desses dias corresponderam a fim-de-semana. O estudo decorreu em condições de luminosidade diurna e nocturna e o pavimento, durante esse período esteve seco e molhado.

Os resultados deste estudo, devido à sua extensão, constam do Apêndice 4. Os resultados apresentados não estão comentados por se destinarem apenas à simulação computacional da velocidade por tipo de via. Os comentários sobre os efeitos da velocidade na segurança rodoviária constam do Capítulo Segundo. Este quadro colocou-se no texto principal para revelar a estrutura da informação recolhida.

Quadro 6.9 – Distribuição de velocidades em auto-estrada.

Velocidades	Total dos dias		Fim-de-semana		Dia útil	
(Km/h)	Ligeiros	Pesados	Ligeiros	Pesados	Ligeiros	Pesados
Velocidade limite	120	90*	120	90*	120	90*
Velocidade média	121	111	121	107	121	112
Veloc. Mínima (0-40 km/h)	32	1	9	1	23	0
Veloc. Máxima (160-180 km/h)	7454	371	3540	1	3914	370
Veloc. Máxima (+180 km/h)	2140	0	920	0	1220	0
Percentagem acima limite	54%	78%	53%	77%	54%	79%
+ 10 km/h	37%	64%	37%	61%	37%	66%
+ 30 km/h **	12%	48%	12%	40%	11%	51%
+ 60 km/h ***	1%	23%	1%	16%	1%	26%
Número de observações	196977	24948	90256	6177	106721	18771

* 90 km/h para veículos pesados de mercadorias; 100 km/h para veículos pesados de passageiros;

** 20 km/h para veículos pesados; *** 40 km/h para veículos pesados.

Do estudo citado extraiu-se apenas a informação que se considerou relevante para a modelação, designadamente, a velocidade mínima e máxima verificadas nas diferentes classes de via, a percentagem de excessos relativamente à velocidade limite legal e o número de observações efectuadas.

5.2.3.6 Resumo

O modelo do factor veículo, com vista à sua simulação computacional, poderá ser composto pelas seguintes partes elementares, variáveis de baixo nível, e respectivos atributos e valores escalares.

Quadro 6.10 – Resumo das variáveis, atributos e valores escalares do factor veículo.

Variáveis	Atributos	Escalas	Obs.
Segurança	Activa	-----	Evita o acidente
	Passiva		Evita as consequências
Tipologia	Ligeiro de passageiros	Quantos???	
	Ligeiro de mercadorias		
	Pesado de passageiros		
	Pesado de mercadorias		
	Semi-reboque		
Mobilidade	Pesado com reboque	20 – 180 km/h 0,4 – 2 ms ⁻² 1 – 10 ms ⁻²	
	Velocidade		
	Aceleração		
	Desaceleração		

6.2.4 Factor humano

O factor humano é o último dos subsistemas do sistema rodoviário aqui tratado. O factor humano integra um sistema complexo adaptativo. Pelo que de todos os subsistemas que integram no sistema rodoviário é o mais complexo, não só pela sua complexidade individual, senão também pela complexidade resultante da interacção humana.

Todavia, para efeitos da presente modelação o factor humano é observado apenas no desempenho das funções de condutor de um veículo automóvel e de peão. Nesta medida, para o exercício da condução o factor humano carece de algumas capacidades e competências, designadamente, físicas, psicológicas, comportamentais e técnicas.

5.2.4.1 Modelo do processo da informação na condução

O acto de conduzir, trata-se de um processo contínuo de tomada de decisões e de acções, como o descreve Shinar (1978) no “Modelo de Processamento da Informação na Condução”. Apesar da antiguidade deste modelo, este continua perfeitamente actual. Este modelo descreve o acto de conduzir a partir da recepção de múltiplos estímulos interiores, relacionados com o comportamento e os instrumentos de leitura do próprio veículo, e exteriores, relacionados com os outros veículos, com a via, o ambiente e os peões. A informação é captada pelos órgãos perceptivos do condutor, sobretudo, da visão, cuja informação é seguidamente processada pelo cérebro com vista à tomada das decisões e posteriores acções, executadas através dos mecanismos de controlo dinâmico do veículo. Os resultados das decisões e das acções tomadas originam novos estímulos que geram novos ciclos de processamento da informação, que se repetem durante todo o acto de conduzir.

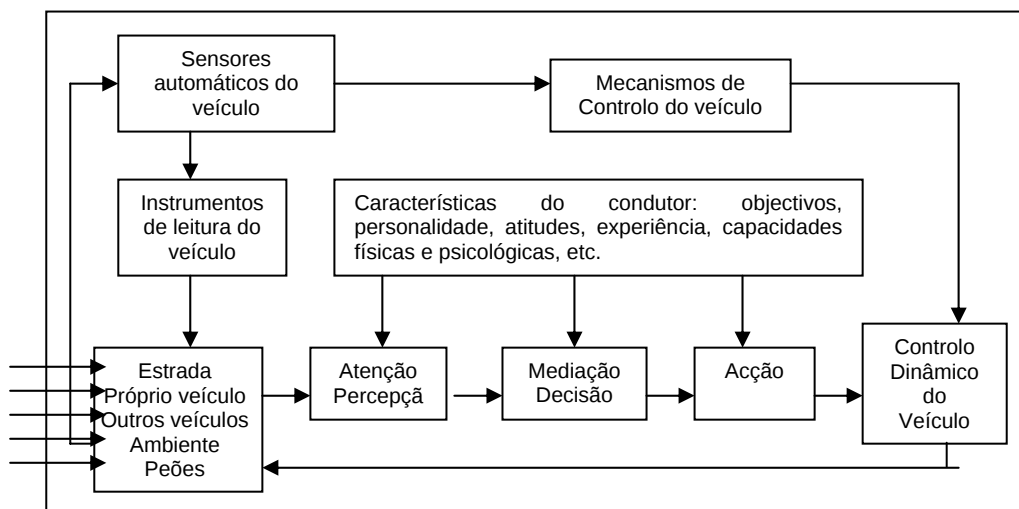


Figura 6.10 – Modelo de processamento da informação na condução (Shinar, 1978).

A decisão e a acção dependem das características específicas do condutor, como as descreve Luís Montoro (2002). O acto de conduzir considera-se um processo bastante complexo, pela quantidade de estímulos que o condutor recebe a todo o instante, o que implica uma contínua tomada de decisões e de acções. Para o efeito, o condutor deve possuir um conjunto importante de requisitos nos seguintes domínios:

- Psicológicos (cognitivos, afectivos e psico-motores): o processo de atenção, percepção, assimilação, decisão e acção é fundamental para a condução com segurança;
- Atitudes: favoráveis à segurança, acatamento das normas e altruísmo;
- Físicos: boas capacidades físicas, sobretudo, de visão, de audição e somáticas;
- Técnicos: conhecimento das normas, do acto de conduzir e perícia para a manobra do veículo.

Todavia, procurando simplificar o acto de conduzir, todo o conjunto de conceitos referentes ao acto de condução, identificados por Shinar e por Montoro, poderão ser resumidos em três variáveis: as competências técnicas, o tempo de reacção, a capacidade de visão e o comportamento.

5.2.4.2 Competências técnicas

Os condutores para o exercício da condução carecem de obter a habilitação legal, pelo que são submetidos a vários tipos de testes: médicos, teórico e prático.

- Os testes médicos visam avaliar as capacidades físicas e psicológicas para o exercício da condução;
- Os testes teóricos, efectuados pela entidade competente para conferir a habilitação legal, visam avaliar os conhecimentos teóricos dos candidatos sobre as normas de circulação rodoviária; e
- Os testes práticos, realizados pela mesma entidade, destinam-se a avaliar as competências práticas do exercício da condução.

Dito deste modo, o modelo de formação de condutores parece perfeito e funcionar em pleno. Todavia, os acidentes rodoviários acontecem e os intervenientes (condutores) parecem não concordar com o resultado e a consequência dos mesmos. Assim, é legítimo questionar se este sistema de formação é ou não adequado e se evoluiu de acordo com a evolução das vias e dos

veículos, ou seja, com o sistema rodoviário. E se está adaptado às exigências que o sistema rodoviário hoje impõe ao condutor.

Em todo o caso, esta parte não será objecto de modelação, partindo-se do pressuposto que os condutores correspondem efectivamente às exigências que o sistema lhe impõe. Tanto que o objectivo desta modelação, através da simulação de vários cenários, será exactamente a de pesquisar as falhas do sistema.

5.2.4.3 Tempo de reacção

Todo o processo de percepção de estímulos, processamento da informação e acção estão intimamente ligados à atenção e ao tempo de reacção. Por outro lado, a atenção também influencia o tempo de reacção. Deste modo, o tempo de reacção é o resultado operacional (prático) do processo de atenção-percepção-decisão-acção. Ou seja, o que é verdadeiramente importante, em termos de segurança rodoviária, é agir em tempo oportuno face à percepção dos estímulos. Todavia, este processo poderá ser especialmente prejudicado por um conjunto de circunstâncias já sobejamente conhecidas, relacionadas com o consumo de álcool, de droga, o cansaço, etc... Todavia, mais uma vez, na prática, o que resulta afectado é o tempo de reacção do condutor.

O **Tempo de reacção** corresponde ao intervalo de tempo que decorre desde o instante em que a pessoa se apercebe da situação até ao começo da actuação. O tempo de reacção de um condutor pode ser considerado como o somatório dos tempos de percepção e de actuação.

Existem vários estudos sobre a quantificação dos tempos de reacção. Todavia, não existe uniformidade nos resultados. Segundo James Green (2003), o corpo humano tipicamente reage fisiologicamente de 0,75 a 1,5 segundos, a situações de estímulos expectáveis. Como exemplo deste tipo de reacção temos o caso de uma pessoa que reage a um súbito flash de luz num laboratório. Para Marc Green (2000) a resposta a sinais inesperados mas comuns, como a reacção ao acendimento das luzes de stop do carro que circula à sua frente é de cerca de 1,25 segundos. Para situações de surpresa, como um objecto movendo-se subitamente em direcção ao condutor, o tempo de reacção é aproximadamente de 1,5 segundos.

Quadro 6.11 – Tempos de reacção médios dos condutores.

Expectativa	Percepção	Acção	Total
Esperado	0,5	0,2	0,75
Inesperado	1,05	0,2	1,25
Surpresa	1,2	0,3	1,5

Segundo Cardoso (1999), do LNEC, nas normas de projecto das vias, por vezes, são considerados separadamente os tempos de reacção em situação esperada e inesperada. Nos EUA, por exemplo, adoptaram-se tempos de 2 segundos para a travagem esperada e 2,7 segundos para a travagem inesperada. No caso português, as normas da JAE, pressupõem, para o caso da paragem de emergência, tempos de reacção de 1,8 segundos. (Cardoso Lourenço, 1999)

Por outro lado, Gordon (1984) propõe como tempos totais de reacção, incluindo o tempo de travagem, um mínimo de 2,28 segundos e um máximo de 4,55 segundos.

Quadro 6.12 – Composição dos tempos de reacção em situação de travagem de emergência (segundos). (Gordon,1984)

Actividade	Percentil da distribuição		
	50%	85%	99%
Latência	0,24	0,31	0,45
Movimento ocular	0,09	0,09	0,09
Fixação	0,20	0,20	0,20
Reconhecimento	0,40	0,50	0,65
Percepção	0,93	1,10	1,39
Decisão	0,50	0,85	1,00
Aplicação da travagem	0,85	1,24	2,16
Total	2,28	3,19	4,55

Assim, para efeitos de simulação considera-se como valor mínimo escalar do tempo de reacção de 1,8 segundos e como máximo de 4,55 segundos, incluindo a aplicação da travagem. Todavia, há que reflectir que os valores máximos dependem da atenção prestada pelos condutores aos estímulos recebidos do ambiente, podendo existir tempos superiores ou até não existir nenhum tempo. Veja-se o caso de um condutor que adormece durante a condução.

5.2.4.4 Capacidade de visão

No que respeita às capacidades físicas do condutor, estas encontram-se estabelecidas nos regulamentos que definem os seus valores mínimos para que a administração pública confira a habilitação legal para aos candidatos. Assim, em termos de segurança rodoviária, poderá considerar-se que todos os condutores possuem as capacidades físicas mínimas para o exercício da condução. Estas, por motivos vários, em determinadas circunstâncias, poderão estar especialmente diminuídas, pelo consumo de álcool, de drogas, da fadiga, etc. Todavia,

de todas as capacidades físicas necessárias para a condução, aquela que os autores consideram mais importante é a capacidade de visão.

Alguns autores referem que 90% da informação que usamos na condução é recebida pela visão, logo, a visão é o sentido mais importante para a condução (Shinar, 2007). A deficiente recolha de informação origina erros graves de avaliação das condições de trânsito, que podem aumentar o tempo de resposta e levam o condutor a tomar decisões e a agir tardiamente e de forma desajustada, provocando possíveis situações causadoras de acidentes. A visão é um conceito multidimensional, ou seja, os factores que influenciam o desempenho funcional da visão são: a acuidade visual, a luminosidade, o contraste, a cor, o campo visual e a percepção em profundidade (Bívar e tal., 2004).

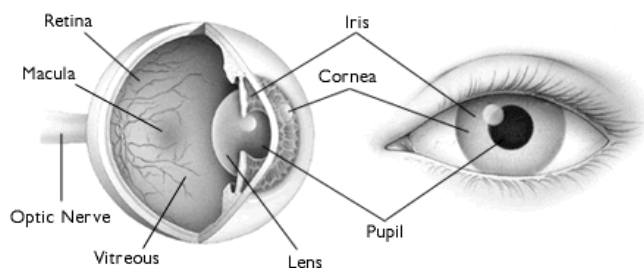


Figura 6.11 – O olho humano

- A acuidade visual – A essência da visão consiste na capacidade para perceber a forma dos objectos, dependendo assim da sensibilidade luminosa e da discriminação do estímulo individual, enquanto a acuidade visual consiste na interpretação das imagens, pelo que pressupõe a interferência do cérebro e a integração da percepção visual nas experiências vividas.

- A luminosidade - O conforto visual está directamente relacionado com os níveis de iluminação. A iluminação excessiva (encandeamento) reduz a sensibilidade da retina e altera as condições de indução espacial e temporal. Existe um tempo de adaptação da acuidade visual, quando se passa de um nível de iluminação para outro, a que se chama *Adaptação Transiente*. Assim, na adaptação ao claro a pupila entra em miose (contrai) em 4 segundos e a retina adapta-se à visão fotópica³ em cinco minutos; na adaptação ao escuro a pupila entra em midriase (dilata) em 20 segundos e a retina adapta-se à visão escotópica⁴ em 30 minutos.

³ *Regime Fotópico* – regime da visão, que é caracterizado por altas luminâncias. Como consequência disso, a abertura pupilar tende a diminuir o seu diâmetro, limitando assim a quantidade de luz que atinge a retina, que de outro modo provocaria situações de encandeamento. A zona da retina onde se forma a imagem nestas condições, denominada de fôvea, a que corresponde um regime de visão central, é constituída por fotoreceptores denominados cones, que apresentam diâmetros extraordinariamente pequenos, ao contrário dos bastonetes que

- O contraste – É a influência recíproca de duas impressões visuais justapostas no espaço ou no tempo. A sensibilidade ao contraste é a capacidade de distinguir um objecto que se encontra num plano de fundo.



Figura 6.12 – Representação da qualidade visual em diferentes condições de luz.

- A cor – A cor é percebida por foto-receptores. Os foto-receptores são células sensíveis à luz e que a convertem em impulsos eléctricos. Existem dois tipos diferentes de foto-receptores: os bastonetes e os cones. Os bastonetes são os foto-receptores responsáveis pela visão no lusco-fusco e situam-se na periferia da retina. Os cones são os foto-receptores responsáveis pela nitidez de visão e pela visão das cores.

- O campo visual - O campo de visão do ser humano é maior quando está parado. Tipicamente, a visão primária encontra-se entre 10°~12° da linha de visão. No entanto, os objectos podem ser detectados para além deste limite, através da visão periférica, mais concretamente, 90° para cada um dos lados, 60° para cima e 70° para baixo. Isto significa, que quando parado, o ser humano, tem um campo de visão de 180° na horizontal e de 130° na vertical. Contudo, estes valores são alterados em condições de movimento. A uma determinada velocidade, a nossa visão tem tendência para instantaneamente focar pontos mais distantes, na direcção do movimento, reduzindo deste modo, o campo de visão nas restantes direcções, por exemplo, a uma velocidade de 10 km/h o campo de visão é de 180° e a 120 km/h o campo de visão na horizontal é de cerca de apenas 30°.

apresentam diâmetros superiores e que são periféricos em relação à referida zona. Aqui, as imagens obtidas, apresentam uma elevada resolução, com elevado contraste e correcta definição das cores.

⁴ *Regime Escotópico* – regime da visão caracterizado por baixas luminâncias, em que a abertura pupilar assume um maior diâmetro, para que uma maior quantidade de luz possa atingir a retina e contribuir para a formação de uma imagem com alguma definição. Nestas condições, os fotoreceptores, existentes na retina, na zona onde se forma a imagem, são predominantemente bastonetes, que sendo extraordinariamente sensíveis a intensidades luminosas muito baixas, garantem uma fraca resolução para as mesmas. Neste regime, não existe sensibilidade à cor, apesar de esta estar presente. Verifica-se no entanto, um pico de sensibilidade para um comprimento de onda na gama do azul.

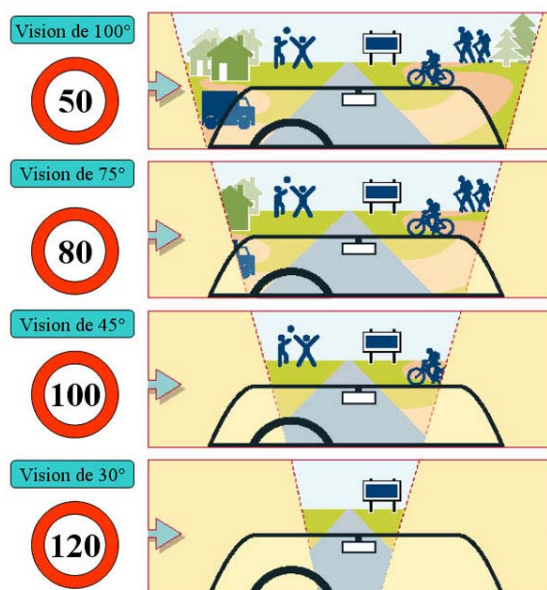


Figura 6.13 – A influência da velocidade no campo de visão. (Drivingvision)

Segundo alguns estudos realizados, o tempo de reacção aumenta em condições de fraca visibilidade. Assim, factores como baixo contraste, visão periférica, mau tempo, etc., atrasam a resposta. Acresce que virtualmente, todos os estudos relativos ao tempo de reacção foram levados a cabo com situações de altas luminâncias, ou seja, em regime de visão fotópica. À noite, em áreas urbanas, a visão processa-se em regime mesópico⁵, ou seja, há uma visão em que simultaneamente estão activos os dois tipos de foto-receptores existentes na retina (Figura 6.11), os cones e os bastonetes. A pequena quantidade de informação existente, sugere que o tempo de reacção aumenta consideravelmente à medida que os bastonetes se tornam os foto-receptores dominantes. Por outro lado, existem algumas situações em que a resposta é mais rápida em condições de baixa luminância, como por exemplo, na presença de sinalizações reflectoras nas auto-estradas, em alguns sinais de trânsito, luzes de travagem, etc., que originam melhores tempos de reacção à noite.

Apesar da quantidade de estudos existentes sobre a importância da visão para a condução, surpreendentemente, não existem estudos científicos fiáveis que relacionem a capacidade visual com o envolvimento dos condutores em acidentes (Shinar, 2007).

⁵ *Regime Mesópico* – regime de transição entre o fotópico e o escotópico, onde a abertura pupilar assume valores intermédios e em que há um contributo simultâneo dos cones e dos bastonetes para a formação das imagens. Neste regime, praticamente todos os parâmetros já referidos, são intermédios relativamente aos outros dois regimes (fotópico e escotópico). O intervalo de luminância correspondente é bastante variável e de fronteiras pouco definidas. Com efeito, é possível definir com precisão, o limite inferior do regime escotópico, chamado de umbral absoluto ou limiar da visão, tal como é fácil definir o limite superior do regime fotópico, ou seja, a intensidade luminosa a partir da qual se verifica o encandeamento. No regime mesópico, o intervalo/gama de luminância é de difícil determinação experimental.

Estas, como tantas outras afirmações em matéria de condução e acidentes, baseiam-se em conceitos teóricos, mas de uma prática evidente; a relação acidente - defeito visual é difícil de estabelecer, pois, como repetidamente se vem referindo, um acidente não se pode atribuir a um conceito isolado devido à infinidade de circunstâncias que concomitantemente contribuem para o seu acontecimento.

Alvar R. Lauer, numa investigação que envolveu milhares de sujeitos, classificou os condutores, do ponto de vista visual, em sete categorias:

- A - Visão muito superior: 5%.
- B - Visão ligeiramente inferior a A.: 10%.
- C⁺ - Ligeiramente superior à média: 20%.
- C - Tipo médio: 30%.
- C⁻ - Ligeiramente inferior à média: 20%.
- D - Próximos a E: 10%.
- E - Com visão pouco satisfatória: 5%.

Deste estudo poder-se-á concluir que 35% dos condutores situam-se abaixo da média e 15% deste grupo tem uma visão que praticamente os incapacita e torna perigosos na condução. Daqui a necessidade de submeter todos os condutores a uma pesquisa da sua capacidade visual.

Por outro lado, a velocidade que um condutor pode alcançar é também função da sua capacidade visual; só se o condutor for capaz de identificar o perigo atempadamente poderá ter a reacção necessária e eficaz para a manobra requerida e entre elas uma travagem, que vai condicionar, quanto aos seus efeitos, a mesma velocidade. Por exemplo, um sujeito com uma visão 20/20, na tabela de Snellen, pode ler as letras de um sinal rodoviário, de 12 a 13 centímetros de tamanho, a uma distância de 85 metros; se a visão for de apenas 20/40 (mínimo aconselhado pela “ American Optometric Association”), terá de aproximar-se até 35 metros, e se a visão for de 20/50 só a lerá claramente a uma distância de 27 metros.

5.2.4.5 Comportamento

Por outro lado, a decisão é também afectada pelas atitudes do condutor. O condutor decidirá cumprir ou não determinadas regras de acordo com as suas crenças. Logo, o que na prática acontece é que as atitudes e crenças do condutor se expressam através do seu comportamento. O comportamento dos condutores foi objecto de estudo de Ajzen (1975), que pela sua importância científica se considera importante aqui citar, assim como outros estudos sucedâneos.

A teoria da acção racional de Ajzen

Segundo um trabalho de investigação realizado por Barros e Loureiro (1995) que visa estudar um conjunto de dimensões sociocognitivas (crenças, valores, expectativas e atitudes) determinantes dos comportamentos dos condutores portugueses, entre os factores mais importantes na explicação das situações de risco e de acidentes rodoviários, podem mencionar-se dois tipos de comportamentos dos condutores: erros e transgressões. Estes dois tipos de comportamentos tendem a apresentar etiologias diferentes, o que deve implicar a adopção de formas de intervenção diferenciadas. Enquanto os erros se baseiam em processos perceptivos, de atenção e cognitivos, e face à sua ocorrência se deve intervir a nível do treino dos condutores na utilização dos seus recursos de uma forma mais cuidadosa e eficiente: as transgressões, por outro lado, encontram-se sobretudo baseadas em factores de ordem motivacional e atitudinal, devendo-se neste caso agir ao nível das crenças, valores e atitudes (Manstead, 1993; Parker e al., 1992).

A perspectiva teórica que orientou esta investigação é uma das que mais atenção tem despertado quanto à predição e compreensão do comportamento humano, sendo a “Teoria de Acção Racional” de Fishbein e Ajzen (1975), posteriormente reformulada pela “Teoria do Comportamento Planeado” de Ajzen(1985). Ambos os modelos se orientam para a exploração do comportamento intencional, racional ou planeado dos indivíduos, enquanto determinante final do comportamento.

Em meados da década de 70 Martin Fishbein e Icek Ajzen (1975) começaram a desenvolver uma perspectiva teórica que estabelecia a relação entre atitudes e comportamentos. Este modelo, que se tornou conhecido como a Teoria da Acção Racional. (Fig. 6.14), postula que a intenção comportamental é o precursor mais imediato do comportamento e que é determinado pela atitude individual para o comportamento em questão e pela norma subjectiva. Por outro lado, as atitudes comportamentais são determinadas pelas crenças individuais sobre a avaliação das consequências (crenças comportamentais) e pela avaliação da importância dessas consequências (avaliação dos resultados). As crenças comportamentais referem-se à probabilidade subjectiva de que a execução de determinado comportamento produzirá determinadas consequências.

Os determinantes das normas subjectivas resultam das percepções individuais das expectativas sociais relativas à execução do comportamento em causa – crenças normativas – e da motivação para concordar/agradar com o referente em questão. As crenças normativas

referem-se essencialmente à importância atribuída aos grupos ou indivíduos de referência, da sua aprovação ou desaprovação na execução de determinado comportamento.

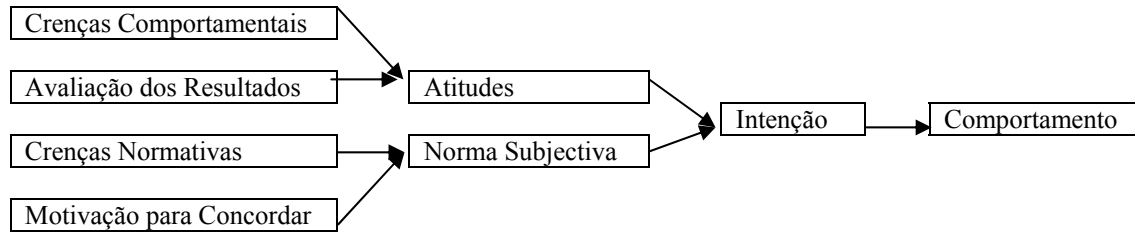


Figura 6.14 – Teoria da Acção Racional de Fishbein e Ajzen (1975).

Resumindo, o modelo apresenta dois componentes principais, um de ordem pessoal e outro de ordem social, capazes de prever intenções e consequentemente comportamentos.

Embora a teoria da acção racional tenha sido bem sucedida numa grande variedade de situações, a sua aplicabilidade restringe-se a comportamentos sob controlo volitivo, não contemplando uma grande parte dos comportamentos sociais, que não podem ser caracterizados como completamente volitivos. Ajzen (1988), propõe, assim uma extensão deste modelo que se designou por Teoria do Comportamento Planeado.

Teoria do comportamento planeado (Ajzen, 1988)

Este modelo (Fig. 6.15) é uma evolução do modelo anterior. Ele mantém os dois determinantes das intenções comportamentais referidos na teoria da acção racional, contudo adiciona um terceiro preditor da intenção e de comportamento – controlo comportamental percebido.

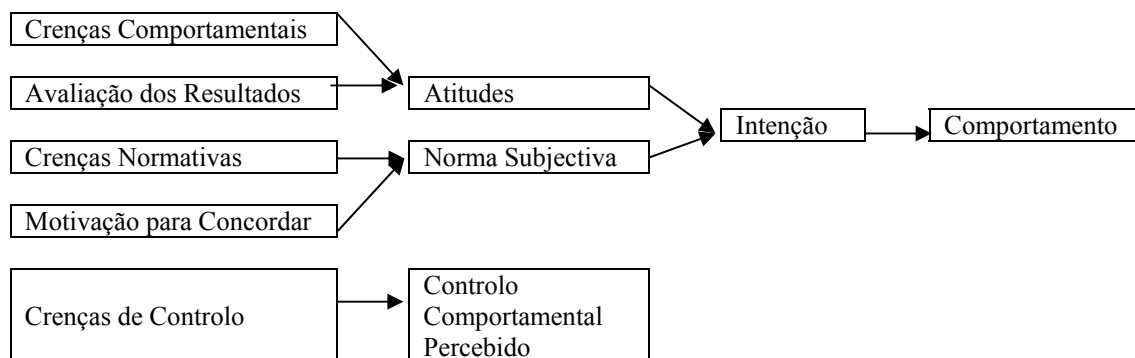


Figura 6.15 – Teoria do comportamento planeado de Ajzen (1988).

Este determinante adicionado refere-se ao grau em que cada indivíduo sente que a execução ou não do comportamento em questão está sob o seu controlo, isto é, refere-se à facilidade ou dificuldade percebida para desempenhar o comportamento, reflectindo, em parte, experiências individuais passadas e a antevisão de dificuldades de desempenho.

O controlo comportamental percebido é determinado pela presença ou ausência de oportunidades e recursos requeridos para executar um determinado comportamento (crenças de controlo). Ajzen (1988) considera que este é o determinante mais importante da intenção, quando o indivíduo tem um conhecimento ou experiência prévia do comportamento em questão. Quando o comportamento em questão é novo e desconhecido para o indivíduo, então o controlo comportamental percebido contribui apenas numa pequena parte para a predictibilidade da intenção.

Em resumo, e como princípio geral, quanto mais favorável for a atitude e a norma subjectiva a respeito do comportamento, e quanto maior for o controlo comportamental percebido, mais forte será a intenção do sujeito para desempenhar o comportamento em questão.

Um outro pressuposto fundamental nestes modelos é que só é possível encontrar fortes relações entre as medidas atitudinais e as medidas comportamentais se ambas corresponderem entre si. Isto significa que a intenção comportamental deverá ser constituída por quatro elementos, nas seguintes condições: implicarem a mesma acção (o comportamento), terem o mesmo alvo (objecto), referirem-se à mesma perspectiva de tempo e partilharem o mesmo contexto. (Barros & Loureiro, 1995)

5.2.4.6 Estudo de campo sobre o comportamento dos condutores

Considerada a necessidade de quantificar o comportamento dos condutores, para efeitos da modelação, procurou-se definir dois tipos de perfil de condutores, relacionados com as regras e os sinais mais importantes em termos de segurança rodoviária, designadamente, o respeito pelos limites de velocidade, em todas as classes de vias, e o respeito pelos sinais luminosos, nas intersecções de vias.

- Limites de velocidade

Assim, no concernente ao cumprimento dos limites de velocidade consideram-se os seguintes perfis, de acordo com o excesso de velocidade verificado face à velocidade limite:

Quadro 6.13 – Perfis dos condutores no cumprimento dos limites de velocidade.

Velocidades	Perfis
Cumprir limites velocidade	Altruísta
+ 10 km/h	Normal
+ 30 km/h *	Agressivo
+ 60 km/h **	Perigoso

* 20 km/h para veículos pesados; *** 40 km/h para veículos pesados.

Para efeitos de quantificação do comportamento dos condutores face aos limites de velocidade sugere-se o uso dos quadros relacionados com a distribuição das velocidades praticadas pelos condutores nas estradas portuguesas.

- Sinais luminosos

No concernente ao respeito pela sinalização luminosa consideram-se os seguintes perfis:

Quadro 6.14 – Perfis dos condutores no cumprimento dos sinais luminosos.

Sinais Luminosos	Perfis	Dados Quantitativos*
Para aos sinais (vermelho/amarelo)	Normal	95,5%
Não para ao sinal amarelo	Agressivo	1,8%
Não para ao sinal vermelho	Perigoso	2,7%

* Resultado de um estudo de campo

Para efeitos de quantificação do comportamento dos condutores face às indicações dos sinais luminosos sugerem-se os dados do Quadro 2.7 do Cap II, sobre a influência do incumprimento dos sinais luminosos.

- Metodologia utilizada

Todavia, considerado o carácter reducionista dos resultados do estudo representado pelo Quadro 2.4.2, que se refere apenas aos casos em que o incumprimento do sinal deu origem a acidentes de viação, efectuei um estudo de campo para avaliar o cumprimento da sinalização luminosa pelos condutores portugueses na área metropolitana de Lisboa, em quatro locais distintos, nas margens norte e sul do Tejo. Na margem norte as observações foram feitas na EN 116, em Mafra e EN 9, em Pêro Pinheiro e na margem sul foram feitas na EN 10, em Azeitão e Coina. As vias eram do tipo urbano e inter-urbano. Os sinais luminosos observados foram os sinais reguladores da circulação e os sinais limitadores da velocidade. O estudo foi realizado no período de 3 de Dezembro a 13 de Dezembro de 2007. As observações foram efectuadas em três períodos distintos: de manhã, das 11,00 às 12,00 horas; de tarde, das 15,00 às 16,00 horas; e à noite, das 22,00 às 23,00 horas, o que fez 12 momentos de avaliação com uma duração de 60 minutos para cada observação.

- Resultados obtidos

Os resultados do estudo foram os seguintes:

Quadro 6.15 – Resultados da avaliação do cumprimento dos sinais luminosos.

	Sinal regulador da circulação	Sinal limitador da velocidade	Resultados totais
Para aos sinais (vermelho/amarelo)	1538 (94,2%)	2692 (96,2%)	4230 (95,5%)
Não para ao sinal amarelo	51 (3,1%)	29 (1,0%)	80 (1,8%)
Não para ao sinal vermelho	43 (2,6%)	76 (2,7%)	119 (2,7%)
Total	1632	2797	4429

Deste estudo conclui-se que: de universo de 4.429 condutores observados, 1,8% não pararam ao sinal amarelo e 2,7% não pararam ao sinal vermelho, o que totaliza um incumprimento de 4,5%. Aparentemente, afigura-se que apenas uma pequena percentagem de condutores não cumpre as indicações dos sinais luminosos. Todavia, se calcularmos a média do tráfego e dos incumprimentos por momentos de observação, concluímos que por cada hora de observação circularam 369 condutores, dos quais 17 não pararam ao sinal vermelho ou ao amarelo, o que significa que, em média, de 3 em 3 minutos há um condutor que não cumpre as indicações dos sinais luminosos.

5.2.4.7 Os peões

Quando se fala do factor humano, em situação rodoviária, por vezes, esquecem-se os peões. Porém, estes têm um papel fundamental, são também actores no cenário rodoviário e possuem também um papel importante em termos de segurança. Assim, considerou-se relevante apresentar algumas das características dos peões que possam ser objecto de simulação rodoviária em ambiente urbano.

De uma forma aproximada, pode-se considerar que um peão raramente excede as dimensões correspondentes a uma elipse com eixos de 0,45 metros e de 0,60 m (AASHTO, 1984). As velocidades de circulação (a passo) oscilam entre os 0,75 e os 1,80 m/s (2,7 a 6,5 km/h), podendo-se considerar que a velocidade média de um adulto masculino com 40 anos de idade é de 1,2 m/s (4,3 km/h) e a de um adulto com mais de 65 é de 0,9 m/s (3,5 km/h).

No quadro seguinte apresentam-se os valores recomendados na Suécia para a largura dos caminhos de circulação de peões e de ciclistas.

Quadro 6.16 – Largura dos caminhos para peões e ciclistas (NRSA, 1973)

Categoria de Utente	Mínimo em Zona com Obstáculos Contínuos	Mínimo em Zona com Obstáculos Isolados
Peão em fila	0,75	0,60
Peão em cadeira de rodas	0,70	0,60
Peão em cadeira de rodas motorizada	0,90	0,80
Encontro de peão e cadeira de rodas*	1,50	1,20
Encontro de duas cadeiras de rodas	2,25	1,80
Bicicleta em fila	-	1,25

* Ou peão e carrinho de bebé.

5.2.4.8 Resumo

O modelo do factor Humano, com vista à sua simulação computacional, poderá ser composto pelas seguintes partes elementares, variáveis de baixo nível, e respectivos atributos e valores escalares.

Quadro 6.17 – Resumo das variáveis de estado, atributos e valores escalares do humano.

Variáveis	Atributos	Escalas	Obs.
Tempo de Reacção		1,8 – 4,55 s	
Visão	Profundidade	30 – 315 m	Variável
	Campo	30° - 180°	
	Acuidade	Boa: 65%;Regular: 20%; Má: 15%	
Comportamento	Velocidade (Superior ao limite legal)	Altruísta: dentro dos limites Normal: + 10 km/h Agressivo: + 30 km/h Perigoso: + 60 km/h	
	Sinais Luminosos	Normal: 95% Agressivo: 1,8% Perigoso: 2,7%	
	Dimensão	0,45 – 0,60 m	
Peão	Velocidade (passo)	2,7 – 6,5 km/h 3,5 km/h	Adulto (40 anos) Idoso (+ 65 anos)

6.3 Validação da modelação

Não existe um contexto teórico que receite uma boa prática de modelação. Todavia, Van Waveren e al. (2000) sugerem que uma boa prática de modelação deve integrar o conjunto de requisitos da figura seguinte.

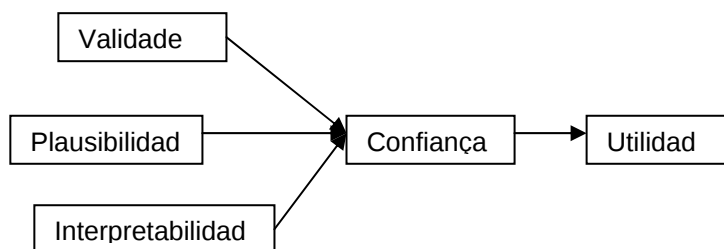


Figura 6.16 – Requisitos de uma boa prática de modelação

- A validade – “*O comportamento de um modelo deve descrever de modo sistemático e rigoroso o sistema alvo*”. Neste contexto, procurou-se caracterizar o sistema alvo de modo multidimensional, identificando os factores conhecidos e as suas características específicas, tentando representá-lo na sua totalidade. Todavia, a fragilidade das modelações depende sempre da sensibilidade do observador.
- A plausibilidade dos conceitos – “*Os conceitos devem ser pelo menos plausíveis e preferencialmente suportados em evidências experimentais*”. Neste aspecto, o modelo proposto suporta-se no conhecimento científico das partes que o compõem e nos valores escalares científica e tecnicamente testados.
- Interpretabilidade do comportamento do modelo – “*Mesmo quando um modelo está validado e os conceitos justificados, a interpretação do comportamento obtido pode ser difícil, porque um modelo é apenas um modelo, podendo o resultado apresentar-se enviesado*”. Considerado o facto deste trabalho pretender apenas desenvolver o primeiro passo, a modelação do sistema rodoviário, para a sua posterior simulação, não é possível, nesta fase, com rigor, verificar se o comportamento do modelo se assemelha ao comportamento do sistema alvo. A simulação apresentada apenas pretende revelar de modo simples e sucinto a metodologia utilizada pelas ciências da complexidade e o potencial desta nova forma de fazer ciência.
- Confiança – “*A confiança num modelo é a variável que a prática da modelação tradicional procura otimizar*”. Foi exactamente neste sentido que, interpretado o sistema alvo à luz dos preceitos da complexidade, se procurou representá-lo de modo mais exaustivo e sistemático possível.
- Utilidade – “*Se um modelo for utilizado para fins preditivos, a sua utilidade será tão mais vasta quanto a determinada pela segurança das suas predições*”. Como o referido anteriormente, nesta fase não é possível efectuar quaisquer predições acerca do fenómeno. Todavia, os fins pretendidos, no futuro, prendem-se exactamente com a predição da

causalidade do fenómeno, numa perspectiva de saúde pública, com vista à identificação de medidas preventivas, relacionadas com todas as partes que interagem no sistema.

6.4 Conclusões

Neste capítulo, de acordo com os preceitos da modelação e das ciências da complexidade, procurei modelar o sistema rodoviário de modo a criar uma representação sintética da realidade. O processo de modelação partiu da observação macro das entidades de alto nível do sistema, ou seja, das propriedades emergentes da mobilidade individual e do trânsito colectivo, para de seguida, através das interacções das partes do sistema, identificar as entidades de baixo nível, a saber: os factores via, ambiente, veículo e humano. Estes factores foram caracterizados pelas suas variáveis de estado elementares, às quais foram atribuídos valores escalares parametrizados de acordo com o conhecimento científico, técnico e empírico existentes. A interacção das partes do sistema funciona pela interacção individual do condutor com o próprio veículo, com a via e com o ambiente, através do processo de condução.

A modelação proposta do sistema rodoviário centra-se na modelagem individual dos agentes, embora construída na perspectiva do programador, com o fim de fornecer a informação considerada necessária para futuras simulações computacionais orientadas para o conflito rodoviário emergido da interacção das partes do sistema.

Esta proposta foi construída para formular uma resposta sobre uma forma de modelar o sistema rodoviário para fins de saúde pública, ou seja, com o objectivo de identificar outras propriedades emergentes do sistema ainda não conhecidas, verificar se o conflito rodoviário poderá ou não considerar-se uma propriedade emergente, quais as suas causas e que factores de risco lhe estão associados, com vista à preconização de medidas preventivas do fenómeno da sinistralidade rodoviária.

Assim, chegados a este ponto, é o momento de perguntar o que é a simulação computacional, como funciona e que simulações computacionais de ambientes rodoviários se conhecem. Questões estas a que procurarei dar resposta no capítulo seguinte.

Capítulo 7

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL E

SIMULAÇÃO DE AMBIENTES RODOVIÁRIOS

Neste capítulo vou proceder ao levantamento do estado da arte sobre a simulação computacional, a simulação de ambientes rodoviários e analisar as metodologias mais adequadas para simular a modelação proposta no capítulo anterior.

7.1 Simulação computacional

Segundo Pocinho (2007), a simulação computacional é uma metodologia de investigação científica experimental suportada na grande capacidade de processamento de elevadas quantidades de informação dos computadores. É uma metodologia usada em diversas áreas de investigação, sendo mesmo em muitas delas considerada uma ferramenta imprescindível. A simulação é particularmente usada durante a fase de desenho de projectos, por que permite, com base num modelo de simulação, uma fácil predição de performances ou a comparação entre diversos modelos, facilitando o estudo e reduzindo os custos. Por exemplo, em áreas como a preparação de pilotos é possível, através da simulação, criar os mais diversos tipos de cenários de modo a permitir treinar comportamentos de resposta adequados a situações mais ou menos críticas.

A simulação computacional, associada à capacidade de processamento incessante dos computadores, apresenta-se também como uma técnica ímpar quando, em cenários de elevada complexidade, se revela impossível o estabelecimento de expressões analíticas de tipo determinístico ou probabilístico na representação do problema. Esta capacidade possibilita o estudo de problemas altamente complexos, que até aqui permaneciam fora do alcance dos métodos tradicionais. (Pocinho, 2007)

7.2 Metodologias de simulação

As metodologias de simulação dividem-se em três grupos de simulação distintos (Jain R. 1991), designados por: método de simulação “Monte Carlo”, o método de simulação por “Comparação regular” (*Trace-Driven*) e o método de simulação por “Eventos discretos” (*Discrete-event*).

7.2.1 O método de simulação “Monte Carlo”.

Este método está na base daquela que se designa por “simulação probabilística”. É uma técnica de simulação para problemas que têm uma base probabilística ou estocástica, onde a

passagem do tempo não desempenha nenhum papel importante. Pode ser aplicado a problemas de carácter estocástico, como por exemplo a simulação de distribuição de probabilidades conhecidas ou empíricas, ou a problemas matemáticos determinísticos que não têm resolução fácil através de métodos determinísticos obtendo-se neste caso soluções aproximadas para o problema.

7.2.2 O método de simulação “Comparação Regular”

Este tipo de simulação é alimentado por valores reais fornecidos com uma determinada periodicidade temporal. É muito usado actualmente em ciências computacionais, para analisar e optimizar processos, nomeadamente na gestão eficiente de recursos num servidor.

Na figura seguinte podemos constatar o diagrama de funcionamento deste método de simulação.

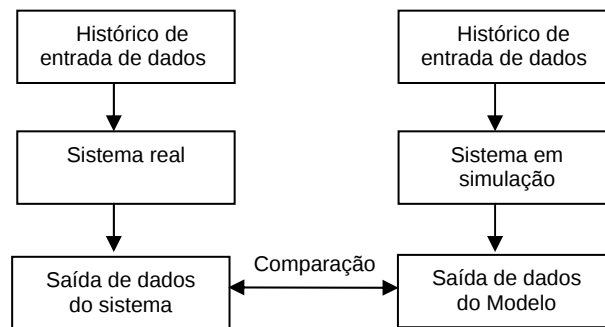


Figura 7.1 – Diagrama do modelo de simulação “Comparação regular”, baseado em (Law & Kelton, 2000, pág.285)

Como se pode constatar no diagrama os dados de entrada são os mesmos no sistema real e no sistema em simulação e as saídas do sistema real são comparadas regularmente com as saídas do modelo, possibilitando assim uma calibração eficiente do mesmo.

7.2.3 O método de simulação por “Eventos discretos”

Todas as simulações baseadas em eventos discretos têm uma estrutura idêntica, independentemente do sistema que está a ser simulado. Associado a este tipo de simulação existe sempre uma inicialização, um relógio, variáveis de estado, variáveis para uso estatístico e uma lista que suporta os eventos a realizar em determinado instante temporal. O diagrama seguinte traduz o ciclo de funcionamento de um simulador deste tipo.

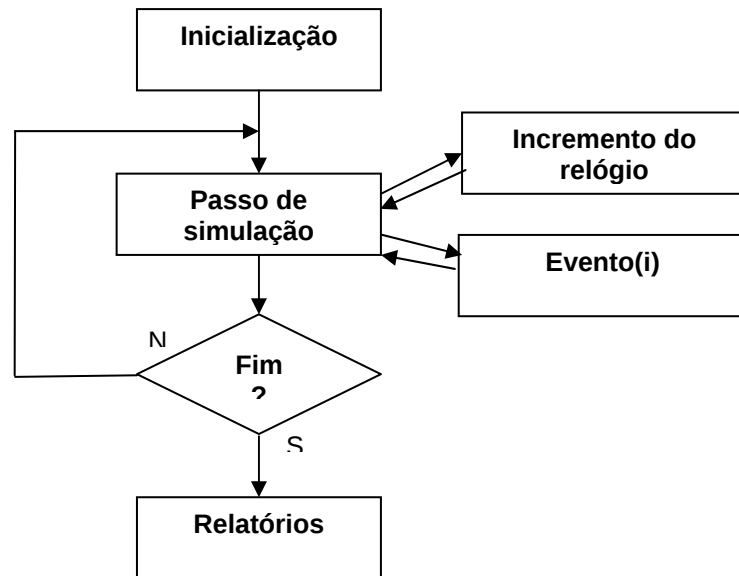


Figura 7.2 – Esquema de um simulador de eventos discretos, baseado em (Law & Kelton, 2000, p. 10).

- **Inicialização:** É inicializado o relógio da simulação, as variáveis de controlo, as variáveis utilizadas na produção da estatística final e também a lista de eventos futuros.

- **Passo de simulação:** Incrementa o relógio e processa evento(i)

- **Incremento do relógio:** Determina o próximo evento a processar e incrementa o contador de passos de simulação.

- **Evento(i):** É processado o evento(i), actualizado o estado do sistema e dos contadores de estatística. É actualizada a lista de eventos e eventualmente são gerados novos.

- **Fim:** A finalização da simulação pode ocorrer por um de dois motivos:

– A lista de eventos está vazia porque todos os eventos foram processados.

– Foi atingido um tempo máximo de simulação previamente definido.

- **Relatórios:** São calculados valores finais, estatísticas e relatórios relevantes.

É de referir que as simulações baseadas em eventos discretos apresentam-se como uma boa metodologia de abordagem no que toca à modelação dos mais diversos tipos de cenários uma vez que esta metodologia é de fácil implementação recorrendo a linguagens de uso corrente, como o C ou o Java.

7.3 O processo de simulação

Segundo (Pelts, 2003) o desenvolvimento do modelo é um processo complexo e propenso a erros, logo a eficácia da simulação depende da qualidade do modelo. Por isso são necessários métodos e ferramentas com a capacidade de verificarem e validarem o modelo. O diagrama seguinte apresenta os relacionamentos entre a realidade e os modelos conceptual e executável, assim como os métodos de “verificação”, “validação” e “qualificação”.

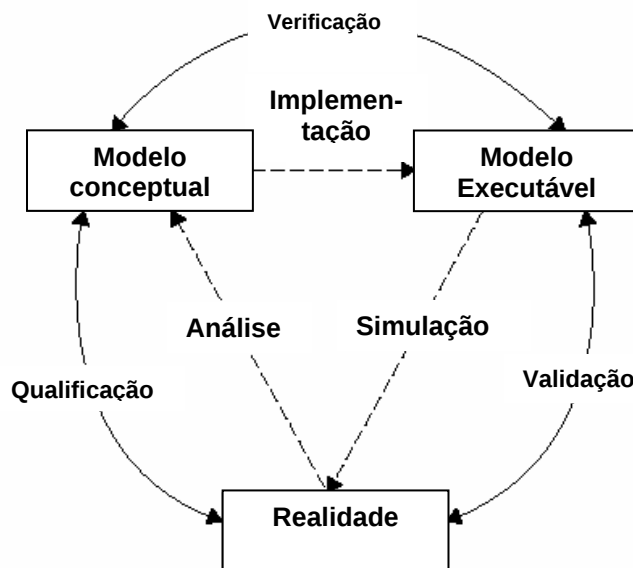


Figura 7.3 – Geração do modelo, simulação, validação e verificação em contexto, baseado em. (Peltz, 2003, pág. 7)

A “verificação” avalia se o modelo executável reflecte o modelo conceptual dentro dos limites de precisão estipulados, para além de transferir o campo de aplicação do modelo conceptual para o modelo de execução. Por outro lado deve dizer-nos se o modelo executável está bem adaptado ao cumprimento das tarefas desejadas. A “qualificação” avalia a qualidade do modelo face à realidade. A “validação”, por seu lado, relaciona apenas o modelo executável com o mundo real, podendo existir vários graus de validação.

7.4 Modelos de micro-simulação

Segundo Pocinho (2007), a micro-simulação é uma técnica de modelação que opera ao nível do elemento a simular, por exemplo uma pessoa, um veículo, um insecto, etc. Dentro do modelo, cada elemento é representado por um objecto e que tem associado um conjunto de atributos, por exemplo a idade e o sexo, ou a velocidade e o destino, ou a cor e o tamanho das antenas, etc. Ainda associadas a cada elemento do modelo existem um conjunto de regras probabilísticas ou determinísticas, que com base nos estímulos emitidos por outros elementos

e ou com base nos eventos ocorrido no próprio mundo em que o elemento está inserido, determinam como esse elemento se comporta face a um determinado tipo de acontecimento, ou simplesmente descrevem o seu comportamento. Por exemplo as regras que determinam a mudança ou não de via na faixa de rodagem.

Os modelos de micro-simulação estão estreitamente relacionados com outros dois modelos: o modelo do “autômato celular” e o modelo “baseado em agentes”. Estas três abordagens e o seu interrelacionamento são usualmente representados pelo triângulo que de seguida se apresenta. (Pocinho, 2007)

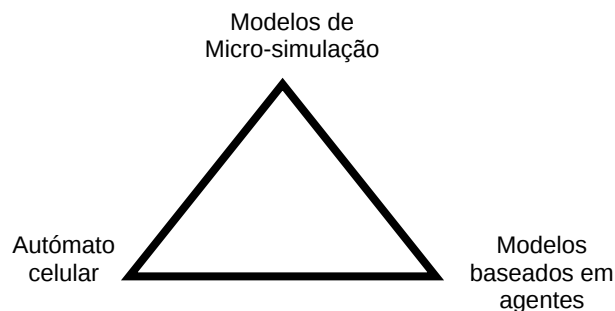


Figura 7.4 – Abordagens de modelação a nível individual. (Pocinho, 2007)

7.4.1 Simulação baseada em agentes

O conceito de agente surge como uma consequência natural dos paradigmas de programação orientados por objectos. O agente, no entanto, mais do que um simples objecto de uma classe, é visto como uma entidade autónoma inserida num meio que pode ser apercebido e com o qual pode interagir. Desta interacção pode resultar a mudança de comportamento desse agente específico, ou de outros agentes inseridos no mesmo meio. Assim, cada agente tem o seu ‘conhecimento próprio’, resultante das suas características próprias e das suas ‘vivências’ no meio em que está inserido. Cada agente possui estados internos e regras de comportamento. Alguns são fixos e outros dependem do interrelacionamento do agente com os restantes e com o meio. (Pocinho, 2007)

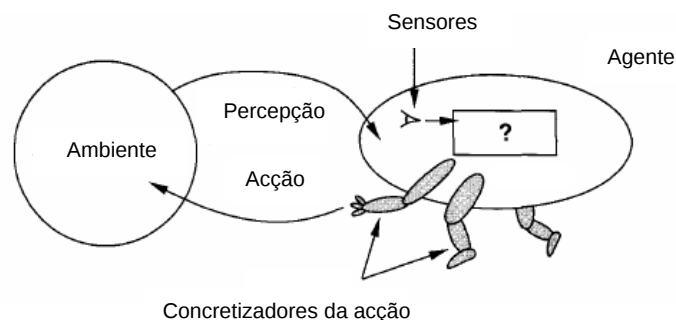


Figura 7.5 – Interacções de um agente genérico com o ambiente em que está inserido, baseado em " (Russel e Norvig, 1995)"

Estas características fazem do agente uma entidade com particular importância quando estamos perante questões de resolução complexa, em que o comportamento do indivíduo é determinado por um conjunto de factores exteriores resultantes das acções de outros indivíduos e das características do próprio meio. Este tipo de comportamento é aquele que se verifica quando estamos perante comportamentos sociais entre humanos, nomeadamente quando estamos em circulação numa faixa rodoviária.

7.5 Linguagens de programação para simulação

Quase todas as linguagens de programação são adequadas à realização de bibliotecas de simulação, no entanto salientam-se algumas das linguagens mais usadas, como sendo as linguagens “C”, “C++” e JAVA.

A linguagem C é muito rápida, mas não suporta objectos e em geral possui um fraco suporte para as necessidades de quem deseja trabalhar em sistemas de simulação baseados em agentes. O C++ é uma linguagem bastante complexa, com suporte para objectos e adequado à simulação baseada em agentes. Permite uma alta performance, mas não possui uma interface gráfica standard com o utilizador, o que complica substancialmente a interacção com o mesmo. O Java é similar ao C++, mas ligeiramente mais simples e inclui uma interface gráfica standard com o utilizador. Esta linguagem, pelo facto de ser interpretada, não permite normalmente uma performance tão elevada quanto o C++. (Pocinho, 2007)

De uma forma geral podemos afirmar que as linguagens orientadas por objectos como o C++ e o Java se posicionam na linha da frente quando se trata da modelação de objectos de carácter social como por exemplo um indivíduo. Pela natureza da sua concepção, os conceitos de classe, propriedades e métodos permitem fazer uma modelação quase directa dos indivíduos a modelar, pois embora pertencentes todos à mesma classe, podem possuir características (propriedades) ligeiramente diferentes entre si, assim como comportamentos (métodos) diferentes face a determinadas vivências. Podem ainda ao longo dessas vivências ir alterando as suas convicções iniciais e formas de agir face a situações já vividas.

7.5.1 Bibliotecas de simulação

A biblioteca de simulação “RePast” têm vindo nos últimos anos a ganhar popularidade e actualmente é considerada por muitos como uma das mais equilibradas para a construção de modelos de simulação baseados em agentes. (Tobias e Hofmann, 2004)

No entanto outras bibliotecas, surgidas recentemente mas em rápida ascensão, podem vir a representar boas alternativas a médio prazo. Por exemplo a biblioteca de simulação

“MASON”, desenvolvida em linguagem ‘Java’ no “George Mason University’s Center for Social Complexity and Department of Computer Science” é uma biblioteca caracterizada por ter sido intencionalmente desenhada a pensar em questões de inteligência artificial e questões das ciências sociais baseadas em agentes, com o objectivo de permitir fertilização cruzada entre as duas áreas. Esta biblioteca é também apresentada pelos seus criadores, como uma evolução, em relação a alguns aspectos, sobre as suas bibliotecas precursoras: Swarm, RePast (Balan, et al, 2003).

7.6 Simulação social

A simulação social visa compreender o porquê de determinados acontecimentos sociais, as suas causas, consequências e prever acontecimentos futuros. A simulação aplicada às ciências sociais é uma área relativamente recente. Se bem que não possa ser considerado ainda um modelo de simulação social, o referido “Jogo da vida” foi um dos precursores do desenvolvimento da simulação social. O interesse pela simulação baseada em agentes, como ferramenta científica, está bem patente no grande número de conferências e *workshops* (AAMAS, CEEMAS, KIMAS, EUMAS, CLIMA) entre outros. Ainda assim, as promessas continuam maiores do que os resultados realmente alcançados (Axelrod, 2003).

Um dos modelos mais adequados à simulação em ciências sociais é o modelo de simulação baseado em agentes. É normalmente caracterizado pela existência de um conjunto de agentes que podem modelar de forma directa e individual as características que se considerem mais significativas para o estudo que se pretende realizar. Posteriormente este modelo poderá permitir o acompanhamento individualizado da evolução dos agentes ao longo de toda a simulação. No entanto o resultado final apresenta-se como um todo, emergente da interacção entre os agentes em simulação. (Pocinho, 2007)

7.6.1 A simulação rodoviária

As primeiras simulações em computador no entanto só começaram a aparecer nos anos 50, com o início da disseminação dos computadores pelas universidades. Desde essa data foram propostas largas dezenas de modelos para a simulação rodoviária quer a nível microscópico quer a nível macroscópico.

Segundo Pocinho (2007), os modelos de simulação rodoviária são tipicamente categorizados e classificados segundo o seu nível de detalhe. Assim as aplicações de simulação rodoviária existentes dividem-se em quatro classes distintas: a *macro-simulação*, a *méso-simulação*, a *micro-simulação*, e a simulação *sub-microscópica*.

- A **macro-simulação**, rodoviária é utilizada normalmente em planeamento de sistemas de transporte a alto nível. Por exemplo ao nível de uma ou várias cidades ou mesmo ao nível da totalidade de um país. Possibilita o estudo e comparação de diversos cenários rodoviários reais ou fictícios dos quais se pretenda avaliar a viabilidade. Com base nestas aplicações de macro-simulação e nas necessidades rodoviárias reais, é possível avaliar o impacto da introdução de uma nova estrada, com determinadas características, no trânsito de uma cidade, em aspectos como: tráfego médio, tempos de viagem, número de acidentes, emissões gasosas, de ruído e consumos de combustível entre outras. A aplicação comercial “Emme/2” é uma das aplicações mundialmente mais utilizadas neste tipo de estudo.

- A classe designada por **mésoscópica**, não é mais que uma variação da classe macroscópica onde, para determinados pontos bem determinados, é utilizada uma simulação microscópica. Podemos dizer que esta classe de simulação abrange as classes macro e microscópica e tem a sua aplicação no estudo de determinadas situações particulares com carácter misto.

- A **micro-simulação** permite abordar os aspectos individualizados associados ao tipo de veículo e algoritmos típicos de condução, bem como o traçado das faixas e sinalização auxiliar, permitindo avaliar de forma mais real as situações vividas ao nível do tráfego urbano e não urbano. A micro-simulação permite simular fluxos de tráfego constituídos por veículos de diversos tipos, que efectuem determinados percursos e que possuem determinadas características físicas e comportamentais. Os algoritmos envolvidos na movimentação destes veículos pretendem representar o interrelacionamento entre os mesmos e como tal o resultado final deve ser o mais próximo possível da realidade. A aplicação comercial “AIMSUN” é bastante recente e suporta este tipo de simulação.

- A simulação **sub-microscópica**, também designada por nano-simulação, é uma classe de simulação que para além dos aspectos já considerados na classe anterior, permite também modelar as diversas características individuais do próprio veículo e do condutor, suportando ao nível do veículo, entre outros, modelos do motor e do sistema de travagem, e ao nível do condutor modelos comportamentais. (Neunzig et al., 2000).

Independentemente da classe, o processo de simulação rodoviária é constituído por um ciclo que se inicia com a análise da situação real e construção do modelo. De seguida são configurados os parâmetros a estudar e o modelo é sujeito à simulação. Os valores resultantes são de seguida confirmados com valores obtidos a partir da situação real. Caso os valores reais, dentro de uma determinada margem, não confirmem os valores previstos pelo modelo

em simulação, este terá de ser ajustado até reproduzir de forma adequada a realidade. A este processo cíclico é dado o nome de calibração do modelo. Após o modelo estar calibrado, pode então ser utilizado com algum grau de confiança no estudo de outros cenários. (Pocinho, 2007)

Em 1999, um estudo efectuado no âmbito do projecto SMARTTEST refere a existência de 57 modelos de micro simulação rodoviária (SMARTTEST 1999, pág. 4). Estes 57 modelos de micro simulação incluem-se em cinco categorias diferentes, designadas por “Urbana”, “Auto-estrada”, “Urbana e Auto-estrada”, “Auto-estrada com Sistemas Automatizados” e “outras”, de acordo com as suas características específicas.

7.6.2 Principais algoritmos de micro-simulações rodoviárias

Dentro do comportamento do veículo em estrada, existem três algoritmos que integram praticamente todas as micro-simulações e que têm sido largamente debatidos ao longo dos últimos 30 anos, no sentido de que estes modelem, da forma mais real possível, o tipo de comportamento referido. Esse algoritmos são designados por algoritmos de: “*Car Following*”, “*Lane Changing*” e “*Gap Acceptance*” e serão descritos nos pontos seguintes.

Seguimento em fila (Car following)

É com base neste algoritmo que é determinado o comportamento em fila, nomeadamente na manutenção de distâncias de segurança em relação ao veículo da frente. Cada veículo, dependendo do seu tipo de condução, tem uma margem de segurança para travagem, que durante o percurso se traduz na manutenção de uma distância pré-determinada ao veículo que segue na sua frente. Esta distância tende a ser menor nos veículos que apresentam um estilo de condução agressiva e maior nos que apresentam estilo de condução mais cauteloso.

Mudança de via dentro da mesma faixa de rodagem (Lane changing)

Este algoritmo determina a forma como os veículos fazem a sua entrada e saída no fluxo de trânsito e como, dentro da faixa de rodagem, determinam a mudança de via. Existem três tipos de mudança de via distintos, os arbitrários, que reflectem estilos de condução, os obrigatórios em caso de fim ou obstrução de via ou saída de faixa, e os de posicionamento, em caso de ultrapassagem a um veículo mais lento ou posicionamento para saída de faixa de rodagem.

Tempo para execução da acção (Gap acceptance)

Este algoritmo controla o tempo mínimo que o veículo demora para fazer a sua entrada com segurança numa via com tráfego ou a executar uma acção como por exemplo o arranque após paragem num semáforo, num sinal de stop ou numa fila de trânsito. Este tempo pretende aproximar o comportamento do veículo simulado à realidade, uma vez que em situações normais o condutor gasta sempre algum tempo a avaliar a situação presente e a tomar uma decisão quanto ao que fazer, quer num arranque quando em fila de trânsito, quer para garantir que a sua entrada numa faixa ou a mudança de via não vai provocar um acidente.

7.6.3 Aplicações comerciais

Um estudo publicado em 2004, efectuado pela “*University Transportation Center for Alabama*” apresenta uma comparação detalhada entre três dos pacotes de software comerciais actuais mais utilizados em micro-simulação rodoviária nos Estados Unidos. Neste estudo são abordados: o “*CORSIM*” (*Cornell Microsimulation Model*), o “*SimTraffic*” e o “*AIMSUN*” (*Advanced Interactive Micro-Simulation for Urban and Non-Urban Networks*) (UTCA Report 02217, 2004). Estas aplicações estão disponíveis comercialmente e funcionam em ambiente Windows. São caracterizadas por possuírem um vasto conjunto de parâmetros configuráveis e como tal irão ser abordados apenas nas suas características mais significativas.

- CORSIM

Esta aplicação começou a ser desenvolvida em 1987 na universidade de Cornell e presentemente está disponível comercialmente na sua versão 5.1. Resultou da junção de dois modelos de simulação desenvolvidos em meados dos anos 70 pelo “*Federal Highway Administration*”, designados por FRESIM (*Freeway Simulator*), destinado à simulação de modelos não urbanos, e NETSIM (*Network Simulator*), destinado à simulação de modelos urbanos.

- Simtraffic (Synchro/SimTraffic)

Esta aplicação foi lançada em 1999 e está presentemente disponível comercialmente na sua versão 6.0 e o seu desenvolvimento é realizado pela empresa “*trafficware*” (<http://www.trafficware.com>). A aplicação foi inicialmente desenvolvida com o objectivo de otimizar tempos na sinalização de controlo de tráfego em circuitos urbanos, mas posteriormente foram acrescentadas novas funcionalidades de simulação, suportando também a simulação em auto-estradas, rampas de acesso e rotundas.

- AIMSUN

Esta aplicação começou a ser desenvolvida em 1993, no Departamento de Estatística e Investigação Operativa na Universidade Politécnica da Catalunha e em conjunto com o editor de estradas TEDI forma o ambiente de simulação rodoviária GETRAM (*Generic Environment for Traffic Analysis and Modelling*), que à presente data está disponível como aplicação comercial de simulação rodoviária, na sua versão 4.2.

As aplicações referenciadas assentam o seu funcionamento numa estrutura de troços interligados representando faixas de rodagem. Os veículos iniciam e finalizam os seus percursos em pontos bem determinados e durante o trajecto que efectuem cumprem os três algoritmos principais atrás mencionados, se bem que com algumas diferenças entre eles. Usam um modelo comportamental para o condutor e outro com as características do veículo para simular as características individuais de condução sobre uma faixa de rodagem. Os algoritmos “*Lane Changing*” são idênticos em todas as aplicações e são caracterizados por tomarem as decisões de saída de faixa de rodagem com base numa análise que se prolonga a 2 troços em relação à posição corrente nos casos do AIMSUN e CORSIM e a 3 troços no SimTraffic.

7.6.4 Simulação rodoviária baseada em agentes

Como ferramenta de modelação para cenários de grande complexidade, como os que são apresentados pelo tráfego rodoviário nas grandes cidades, a modelação baseada em agentes apresentam-se na actualidade como uma técnica poderosa no estudo e na tentativa de compreender e propor soluções para os fenómenos de congestionamento de tráfego. Estes modelos distinguem-se dos tradicionais modelos matemáticos, baseados na dinâmica de fluxos de partículas, pelo facto da sua dinâmica ser determinada pelas interacções entre entidades e entre entidades e meio envolvente. Cada entidade da simulação, em particular os veículos virtuais são modelados em agentes individualizados, que vão ao longo da execução do seu percurso, relacionar-se com os restantes veículos, com a estrada, com o ambiente envolvente e com a infra-estrutura, evoluindo em diversos aspectos e eventualmente alterando as suas convicções iniciais em função das interacções ocorridas durante o percurso corrente ou em percursos anteriores. Do equilíbrio que irá surgir do interrelacionamento entre veículos virtuais, com os restantes componentes do mundo que os rodeiam, emerge um comportamento global que deverá, caso o modelo seja adequado, reproduzir as situações vividas no mundo real.

No ponto seguinte, irão ser analisados alguns trabalhos sobre simulação rodoviária baseada em agentes, de modo a permitir uma reflexão sobre as problemáticas associadas a este tipo de simulação e lançar alguma luz sobre os aspectos a ter em conta na realização de uma biblioteca de simulação deste tipo.

- ***“Multi-agent transportation simulations, draft-in-progress for a book”.***

Segundo Pocinho (2007), este documento é uma versão do trabalho em progresso para um futuro livro sobre simulação rodoviária urbana baseada em agentes. Segundo o seu autor (Nagel, 2004) o objectivo principal deste futuro livro é o de mostrar que é possível, para alguém com alguns conhecimentos de programação, construir de raiz um sistema completo de simulação multi-agente, destinado à simulação rodoviária. A grande maioria dos exemplos e estruturas apresentadas são inspiradas no modelo "TRANSIMS". Neste trabalho o autor parte para a simulação começando nas necessidades que motivam as deslocações dos automobilistas. Com base nestas necessidades são construídos automaticamente os percursos a efectuar e só posteriormente será lançada a micro-simulação. Estes três conceitos agrupados em módulos estão interligados e influenciam-se, quer directa quer indirectamente de acordo com o diagrama da figura seguinte.



Figura 7.6 – Relacionamento entre Módulos, baseado em (Nagel, 2004)

A segunda parte deste documento parte da análise do tráfego numa rotunda e da sua sinalização luminosa, para introduzir conceitos de programação orientada por objectos em C++. São ainda abordados conceitos práticos sobre a construção detalhada das classes de suporte para a representação das estradas reais, que basicamente são constituídas por um conjunto de nós interligados, e para os restantes intervenientes na simulação, como veículos e percursos que estes efectuam. Esta simulação é baseada no princípio do autómato celular e com a execução desta micro-simulação rodoviária são obtidos níveis de congestionamento. A estrada é dividida em células de 7,5 metros e apenas são permitidas ligações simples, de apenas uma via, a outras estradas. A cada momento a célula só pode estar livre ou ocupada e os veículos vão avançando de célula em célula ao ritmo do passo de simulação e avançam ou

não, dependendo da ocupação da célula seguinte. O mesmo raciocínio é utilizado ao nível das intersecções, no entanto a este nível é introduzida uma movimentação com um carácter aleatório de modo a que seja escolhido aleatoriamente um caminho aquando da existência de vários. Ao nível da visualização da simulação, e embora o autor a considere uma necessidade absoluta para grandes simulações, esta não está contemplada no propósito deste trabalho. Ao nível da representação do veículo são contemplados parâmetros como a sua posição tridimensional no mundo, a sua velocidade, aceleração, número de passageiros, entre outros. São também contempladas as filas de espera para entrada em estrada “fila de estacionamento” (*park queue*) e “fila de espera” (*waiting queue*) respectivamente para veículos que entram em circulação no futuro e para veículos que já deviam ter entrado em estrada, mas não o fizeram devido a situação de congestionamento. É ainda apresentado em detalhe a forma de fazer a passagem destes veículos do ramal de acesso, para a faixa de rodagem. São também abordadas as questões relacionadas com a chegada dos veículos ao fim dos seus percursos e muito em especial a chegada ao fim do percurso do último veículo da simulação, pois a partir deste momento podem ser feitas considerações e tiradas conclusões. O autor aborda ainda as questões da velocidade computacional, uma vez que estas simulações podem ser de grandes dimensões. Assinala como boa medida para a simulação o "número de actualizações de veículos por segundo" e refere que a capacidade de simulação de cenários mais complexos está dependente da capacidade de processamento do processador usado. No ponto 18.2 deste documento o autor sugere que uma simulação deste tipo deve ser cerca de 100 vezes mais rápida do que a realidade de modo a ser possível simular 24 horas de tráfego em cerca de 0,24 horas. No sentido de assinalar determinadas situações importantes o autor aborda ainda os mecanismos de geração de “eventos de output” destinados a assinalar mudanças de estados nos percursos dos veículos. São apresentadas de forma detalhada as questões de escolha de caminhos em percursos urbanos, dependentes ou não da congestão dos mesmos e são referidas as questões de aprendizagem "dentro do mesmo dia" e as aprendizagens "dia a dia", respectivamente relacionadas com a adaptabilidade aos percursos face ao congestionamento dos mesmos no decorrer da realização de um determinado percurso e no decorrer da realização de diversos percursos consecutivos. Neste trabalho, o autor assume que apenas 10% dos condutores podem efectuar replaneamento dos seus percursos entre dois dias consecutivos de modo a evitar reacções menos correctas do sistema. Ao nível do planeamento dos percursos diários, o modelo proposto contempla uma penalização por chegadas antes da hora ao destino e penalizações por chegada depois da hora. A ideia destas duas penalizações é a de chegar a um equilíbrio nos tempos associados à realização de um determinado percurso.

Se o condutor chega cedo de mais ao trabalho, pode passar a sair de casa mais tarde o mesmo se aplica de forma inversa no caso de chegar atrasado ao trabalho. O autor aborda também os algoritmos de “*Car Following*” e “*Lane Changing*” bem como os algoritmos relacionados com a sinalização luminosa e viragem em cruzamentos sinalizados e não sinalizados. São abordadas as problemáticas das escolhas de caminhos e do interrelacionamento com outros tipos de veículos e peões e as limitações dos modelos baseados em filas e são referidas as potencialidades da linguagem XML como forma simples e rápida de modelar os cenários a simular. São ainda abordados de forma detalhada aspectos da computação paralela e da problemática da separação das diversas tarefas por diversos processadores. São discutidas as vantagens e as dificuldades resultantes da introdução de múltiplos processadores nos diversos algoritmos propostos ao longo do documento.

Este documento se bem que ainda incompleto é um excelente ponto de partida para quem tiver interesse em estudar as questões da simulação rodoviária baseada em agentes, visto que aborda de uma forma bastante explícita a problemática da construção de modelos destinados à simulação rodoviária e apresenta um vasto background teórico de suporte.

- ***“Agent-Based Activities Planning for an Iterative Traffic Simulation of Switzerland – Activity Time Allocation”*** (Balmer et al, 2004)

Este trabalho aborda a construção de uma micro-simulação rodoviária baseada em agentes para o tráfego de toda a Suíça e é composta por vários módulos: um módulo gerador de actividades, um módulo planeador de percursos e o módulo de micro-simulação propriamente dito. Nesta abordagem, apenas são indicadas as actividades que os agentes vão efectuar, determinadas de forma estatística e com base nelas são criados os percursos de forma automática. Associado a cada agente existe uma base de dados que contém o conhecimento acumulado por esse agente durante a execução dos percursos anteriores, aos quais é atribuída uma pontuação, e com base neste conhecimento é determinado o percurso a efectuar ou é eventualmente “experimentado” um novo percurso alternativo. Quando na execução de um percurso o veículo se atrasa então esse percurso é punido ou ao invés recompensado no caso de ser um percurso bem sucedido. Das repetições sucessivas da simulação em quatro cenários distintos resulta um comportamento que é estudado e com base no qual são extraídas algumas conclusões sobre o tráfego em hora de ponta. Só na área de Zurique, em hora de ponta, a simulação comportará cerca de 260000 agentes, o que implica uma grande capacidade de processamento para levar a cabo uma simulação com estas características. Este trabalho apresenta uma muito maior abrangência, uma vez que a simulação, embora baseada em

agentes, pretende comportar o tráfego de todo um país, com varias centenas de milhar de veículos. Os percursos são gerados automaticamente com base numa estatística de actividades dos condutores reais e existe um mecanismo de punição e recompensa respectivamente associado à realização de um percurso com atraso ou adiantamento e um percurso realizado dentro do tempo esperado. Este mecanismo de punição e recompensa pretende a criação de um equilíbrio em repetições sucessivas da mesma simulação.

- **“A reactive driving agent for microscopic traffic simulation”** (Ehlert e Rothkrantz, 2001)

Este documento descreve um modelo de agente reactivo usado numa abordagem à micro-simulação rodoviária baseada em agentes inteligentes. Este modelo de agente tem capacidade para efectuar condução ao nível táctico e suporta diversos estilos de condução. Para assegurar tempos de reacção rápidos o agente está dividido em regras reactivas com prioridades. Este modelo é destinado ao tráfego urbano, mas pode ser facilmente adaptável a outros tipos de tráfego. Segundo os seus autores este modelo apresenta um comportamento "estilo humano". Aborda as simulações microscópicas nas suas características principais e compara os agentes tradicionais com os agentes reactivos. Apresenta também o diagrama com o modelo proposto para o agente e descreve o seu ciclo de raciocínio.

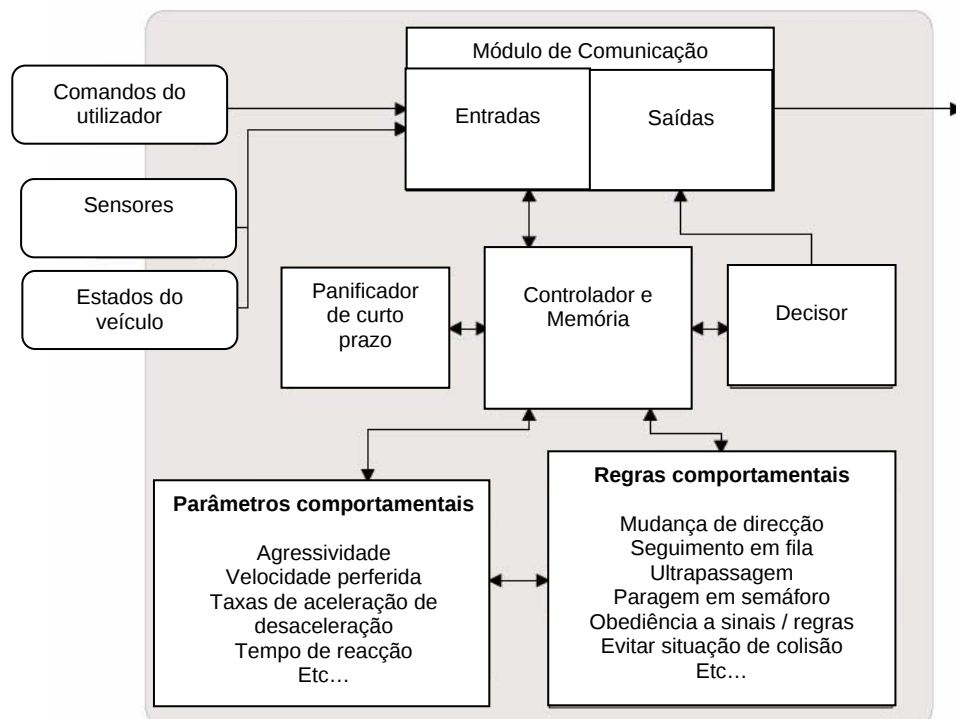


Figura 7.7 – Diagrama do Agente, baseado em (Ehlert e Rothkrantz, 2001)

O modelo contém regras comportamentais adequadas ao tráfego citadino, no caso apresentado, podendo ser acrescentadas novas regras adequadas a outros tipos de cenários.

Existem também parâmetros comportamentais através dos quais são suportadas, para cada agente, diversas preferências e estilos de condução. Estes parâmetros determinam o comportamento do veículo na simulação. Os agentes são implementados em “threads” para otimizar o funcionamento em arquitecturas paralelas e é possível acompanhar a evolução do agente ao longo do desenrolar da simulação. Os exemplos apresentados têm apenas alguns veículos e não devem ser utilizados mais de 30 veículos uma vez que a simulação começa a perder performance. O protótipo foi feito na linguagem “Delphi” e é ainda apresentada uma descrição sumária do simulador.

-“ ***Behavioral Road Traffic Simulation with ARCHISIM***” (Champion et al, 2001)

Este trabalho aborda as potencialidades de um simulador baseado em agentes (ARCHISIM) na resolução de problemas rodoviários. Neste sentido são descritos quatro projectos que utilizam o simulador na resolução de problemas concretos e através destes é possível criar uma boa imagem sobre as suas potencialidades. Engloba a problemática do tráfego no grupo dos problemas de oferta e procura, onde a oferta é caracterizada pelas dimensões e características da rede rodoviária e a procura tem um carácter individual, onde cada condutor deseja efectuar um percurso dentro das suas expectativas e com base nas suas características individuais. São ainda abordados, nos seus aspectos mais significativos, os diversos tipos de simulações rodoviárias disponíveis.

O simulador ARCHISIM assenta num modelo baseado em agentes que resulta de uma pesquisa de 10 anos sobre os reais comportamentos dos condutores. Contém um sub-modelo comportamental para as decisões do condutor e o tráfego resulta das acções individuais dos vários condutores na realização dos percursos em simulação. Os agentes simulam os condutores em veículos virtuais e são constituídos por três sub sistemas: “percepção”, “Interpretação e tomada de decisão” e “acção”. Cada agente tem objectivos e capacidades e interage com os outros agentes, com a infra-estrutura e com a estrada. O comportamento não é normativo, cada agente tem a sua atitude. O ARCHISIM suporta a modificação dinâmica das condições de simulação como as preferências dos condutores virtuais, semáforos e algoritmos de comando. Este simulador foi desenvolvido de modo a suportar um elemento humano, que dentro de um veículo real adaptado e com vista de um cenário 3D onde se desenrola a simulação, participa também nessa mesma simulação. Este é um dos aspectos mais significativos deste simulador, pois permite confrontar a introdução de novos conceitos com uma potencial utilização real. A introdução deste elemento humano permite ainda a

calibração e a validação do modelo em simulação. No diagrama seguinte podemos constatar a integração do veículo real e do elemento humano na simulação.

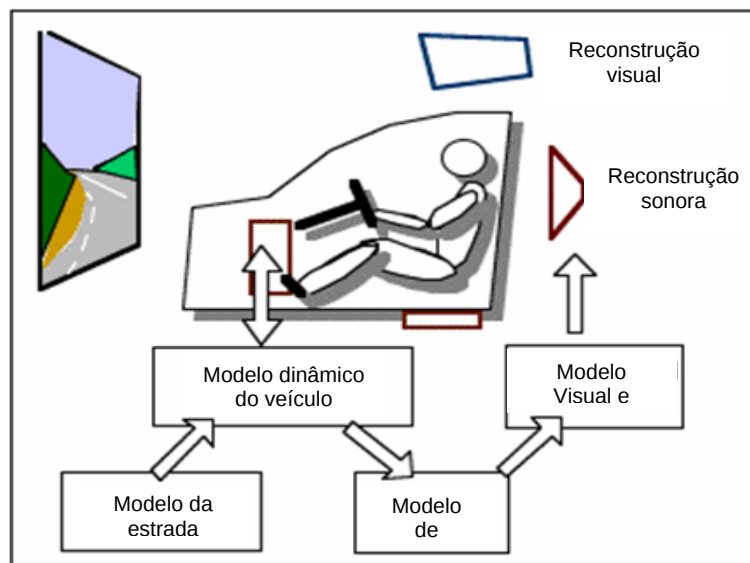


Figura 7.8 – Diagrama do veículo real e elemento humano integrados na simulação.

Este trabalho é baseado num simulador com uma dezena de anos de existência e actualizações na área da simulação rodoviária. É por isso bastante complexo e permite modelar um conjunto bastante vasto de situações rodoviárias. Já tem provas dadas e segundo os seus autores está para muito breve a sua transformação num produto comercial. Uma das características mais significativas deste simulador, quando comparado com outros, é a existência de um veículo real que permite ao elemento humano mergulhar literalmente dentro da simulação e de “a sentir” na primeira pessoa.

- ***“Modelling Vehicle Interactions in Microscopic Simulation of Merging and Weaving”***
(Hidas, 2004)

Este documento foi baseado numa análise de gravações de vídeo sobre movimentações de tráfego em situações de congestionamento e classifica as manobras de mudança de via executadas pelos condutores/veículos em três tipos designadas por: livres, forçadas e cooperativas. Com base neste modelo e considerando os veículos como agentes inteligentes são apresentados os resultados de uma simulação, construída com base no simulador de tráfego ARTEMiS onde são estudados aspectos como a velocidade, tempo de ponderação na tomada de atitudes (*gap acceptance*) e resolução de conflitos. Segundo os seus autores, este modelo consegue simular as situações de congestão de uma forma realista. Esta simulação

suporta tráfego urbano e de auto-estrada e os resultados macroscópicos obtidos também se aproximam bastante dos resultados reais. Um dos seus objectivos é o de investigar a aplicação das técnicas baseadas em agentes inteligentes em modelos de micro simulações rodoviárias com o objectivo de melhorar a sua eficiência e precisão em cenários de tráfego rodoviário complexo.

Neste trabalho é dada ênfase às situações de entrada em estrada e às situações de mudança de via, ao nível das velocidades e comportamentos do veículo que entra e do que permite a entrada. São consideradas as vertentes cooperativas e não cooperativas na realização desta entrada em estrada.

No quadro seguinte são agrupadas algumas das características mais significativas dos trabalhos analisados anteriormente.

		CARACTERÍSTICAS							
		Visualização 2D/3D	Arquitectura multitarefa	Células de estrada	Modelação XML	Memória no percurso	Linguagem usada		
							C++	Java	Delphi
TRABALHOS	Livro em curso Kai Nagel (TRANSIM)	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗
	Traffic Simulation of Switzerland	-	-	-	-	✓	-	-	-
	Reactive driving agent	-	✓	-	-	-	✗	✗	✓
	ARCHISIM	✓	-	-	-	-	-	-	-
	Merging and Weaving (ARTEMIS)	-	-	-	-	-	-	-	-
Simbologia:		✓ - Sim	✗ - Não	- - Desconhecido					

Quadro 7.1 – Tabela resumo sobre trabalhos de simulação rodoviária baseada em agentes. (Pocinho, 2007)

Neste quadro tentou-se fazer um apanhado de algumas das características mais importantes de cada um dos trabalhos analisados. Em alguns desses trabalhos não foi possível no entanto concluir sobre alguns pontos desejados, uma vez que estes são omissos em relação a alguns pontos que apresentariam interesse para este estudo. Não obstante, o trabalho de Kai Nígel aborda de forma bastante estruturada, detalhada e justificada muitas das opções a tomar na construção de uma aplicação de simulação rodoviária, pelo que é um muito bom guia na matéria.

7.7 Conclusões

Neste capítulo foram abordados assuntos relacionados com simulação computacional, metodologias e processos, simulação baseada em autómato celular e simulação baseada em agentes. Foram também abordadas as linguagens de programação mais utilizadas em simulação onde se constatou que a C++ e a Java se posicionam como as melhores linguagens para o efeito.

Constatou-se que a simulação rodoviária é uma matéria que desde a década de 50 tem vindo a ser estudado com bastante ênfase. Nesse percurso foram apresentados centenas de algoritmos, na tentativa de traduzir a movimentação dos veículos nas mais diversas situações rodoviárias do dia a dia. Estes algoritmos no entanto, dados as características físicas do contexto em que decorrem, são divididos em três algoritmos fundamentais, designados por: “seguimento em fila”, “mudança de via” e “tempo para execução da acção”.

Uma vez que se estão a simular veículos, estes têm de obedecer a um conjunto de regras fundamentais associadas às regras de trânsito e por isso os três algoritmos acima referidos são uma presença comum em praticamente todos os trabalhos, embora com algumas diferenças entre eles, estes não são mais que algoritmos que pretendem descrever o comportamento dos veículos em circulação, no seu movimento em fila numa via, quando da mudança de via e o tempo gasto quando pretende efectuar uma mudança de via ou uma manobra.

Da análise dos diversos trabalhos sobre simulação rodoviária baseada em agentes, foi feito um apanhado das suas características mais importantes, sendo que o trabalho de Kai Nagel em particular se destaca, pois para além de comportar um vasto background teórico, aborda os conceitos deste tipo de simulação do ponto de vista da programação.

A avaliar pela rapidez com que as mudanças surgiram nesta área nos últimos anos é de admitir que a simulação continue a tornar-se uma ferramenta cada vez mais essencial em muitas áreas tradicionais e até em muitas outras em que até há bem pouco tempo poderia parecer pouco provável a sua utilização. Recentemente os modelos de simulação baseados em agentes têm assumido um papel de relevo pois permitem uma boa estruturação e modelação em situações de elevada complexidade para as quais a construção de modelos se assumia como uma tarefa gigantesca. Entre estas situações incluem-se por exemplo as relações sociais entre indivíduos de uma sociedade.

Feita uma análise comparativa das simulações apresentadas todas se orientam para obter melhores performances rodoviárias, relacionadas sobretudo com a fluidez rodoviária, quer

solucionando problemas de congestionamentos, quer tratando de melhorar a sinalização. Algumas abordam também o problema de acidentes ocorridos entre veículos. Porém, não foram encontradas referências explícitas sobre o objectivo de simular o ambiente rodoviário numa perspectiva de saúde pública, para pesquisar as causas dos conflitos rodoviários resultantes de acidentes de viação e sobre as suas causas destes com o fim de se conceberem medidas de intervenção preventivas, o que constitui o objectivo do presente trabalho.

Assim, conclui-se que as metodologias e ferramentas aqui apresentadas poderão ser instrumentos poderosos para o estudo profundo das causas do conflito rodoviário e do fenómeno da sinistralidade rodoviária a partir da representação sintética do sistema rodoviário.

Capítulo 8

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A sinistralidade rodoviária é um fenómeno social considerado pela OMS como um problema de saúde pública. Esta mesma organização estimou que os acidentes de viação foram a nona causa de morte no mundo em 1990 e estima que em 2020 venha a ascender à terceira posição. A sua distribuição pelo mundo é proporcional ao estado de evolução económica dos países. As zonas do mundo onde existem melhores padrões de segurança rodoviária situam-se no continente americano e no continente europeu.

Portugal, apesar das várias medidas que têm vindo a ser adoptadas e do sucesso alcançado, continua numa posição pouco favorável quando comparado com os países de menor sinistralidade rodoviária. Feita uma caracterização geral da sinistralidade rodoviária em Portugal, constata-se que os acidentes de viação ocorrem maioritariamente nos arruamentos do interior das localidades, seguindo-se as estradas nacionais. Os tipos de veículos mais envolvidos são os ligeiros e os motociclos.

As causas do fenómeno são atribuídas à acção humana em cerca de 90% dos casos. Todavia, os estudos neste domínio são parcos, e os seus resultados não são uniformes, possivelmente pela dificuldade de analisar isoladamente os vários factores intervenientes no sistema rodoviário - a via, o veículo, o ambiente e humano – já que este só funciona pela interacção entrelaçada e contínua dos mesmos. Por outro lado, as pessoas envolvidas em casos de acidente revelam-se quase sempre incrédulas face ao sucedido, não compreendendo nem aceitando a sua ocorrência, o que constitui um paradoxo estranho.

Constatado este constrangimento pretendeu-se identificar as metodologias científicas utilizadas para o estudo deste problema, tendo-se concluído que existem três abordagens principais: a abordagem de saúde pública, a matriz de Haddon e a abordagem sistémica. Estas abordagens estão de algum modo interligadas. A abordagem de saúde pública prende-se sobretudo com o apoio à decisão de políticas e de medidas de segurança rodoviária. A matriz de Haddon visa gerar uma perspectiva de observação sistemática do fenómeno e a abordagem sistémica, mais elaborada, identifica as partes do sistema e as suas relações de interactividade.

Paralelamente, dando corpo a estas abordagens, existem vários tipos de ferramentas, que se consubstanciam em bases de dados de recolha de informação sobre o fenómeno, as quais têm gerado a informação de suporte às decisões das entidades responsáveis pelas medidas preventivas e de controlo do fenómeno, com grande mérito pelos resultados alcançados.

Porém, o problema não está resolvido e os acidentes e mortes continuam a atormentar as sociedades.

As bases de dados existentes não são uniformes, quer no tamanho quer na profundidade das variáveis analisadas, daí os resultados também o não serem. Por outro lado, a informação produzida por estas ferramentas é recolhida na sequência da ocorrência de casos de acidentes, donde resulta estar condicionada às manifestações pontuais do fenómeno. Acresce ainda que o fenómeno da sinistralidade resulta de um processo estocástico não determinístico, logo apesar da grande quantidade de variáveis que possuem, as bases de dados não conseguem abranger toda a dimensão do fenómeno, nem estabelecer relações directas de causa e de efeito, de modo a prever ou predizer a sua ocorrência. A metodologia utilizada é algo equivalente a autopsiar um cadáver, no qual o coração já não bate e o sangue não circula. Deste modo, não é possível observar o funcionamento das interacções das partes, designadamente as resultantes do processo de condução dos veículos envolvidos. Deste facto decorre a impossibilidade de observar o sistema como um todo. As metodologias científicas tradicionais estudam, pois, um todo *possível* partido em partes, observadas separadamente como um puzzle, sem interacção entre as peças. Assim, considerou-se que estas fragilidades poderão ser ultrapassadas pela representação sintética do sistema rodoviário como um todo, construído a partir das interacções individuais dos agentes envolvidos no sistema.

Este constitui o objecto e o campo de estudo das ciências da complexidade sendo esta uma ciência multidisciplinar, que surgiu em meados da década de 80, no Instituto de Santa Fé, e se dedica ao estudo holístico de sistemas complexos através da inteligência artificial. Esta nova forma de fazer ciência propõe como metodologia a representação sintética do real, pela modelação do sistema, e a sua simulação em laboratórios computacionais para observação da realidade a partir da sua representação virtual, com o fim de despertar intuições preditivas sobre os fenómenos.

Por sistemas complexos entendem-se aqueles que exibem propriedades de emergência, que resultam das interacções individuais agregadas, formando deste modo o todo, que é mais que a soma das partes. Para além da emergência, estes sistemas caracterizam-se ainda pela sua imprevisibilidade, instabilidade, incerteza, adaptabilidade, evolução, auto-organização e irreducibilidade.

Procurando determinar se o sistema rodoviário pode considerar-se um sistema complexo, com vista à sua análise sob os preceitos das ciências da complexidade, analisaram-se as partes que

o constituem, identificaram-se os elementos-base de que são constituídas as partes e o modo de interacção individual e colectiva daquelas, tendo-se identificado como propriedades de emergência a mobilidade individual e o trânsito colectivo. Caracterizou-se também o conflito rodoviário, apreciando as suas causas humanas e a dificuldade dos métodos científicos tradicionais em tratar o problema pelo estudo isolado das suas partes. Por fim, estabeleceu-se uma relação de comparação entre as diferentes partes do sistema, as quais constituem subsistemas do sistema rodoviário, com as propriedades dos diferentes tipos de sistemas, tendo-se concluído que o sistema rodoviário como um todo pode considerar-se um sistema complexo adaptativo, dado que, para além das propriedades de emergência referidas, apresenta ainda outras características, como a imprevisibilidade, instabilidade, incerteza, adaptabilidade e irreducibilidade. Todavia, ficou por esclarecer se o conflito rodoviário, concretamente o acidente de viação, cujo efeito interrompe as propriedades de emergência da mobilidade individual e do trânsito colectivo, pode ser também considerado uma propriedade de emergência do sistema ou uma falha. É, no entanto, certo tratar-se de um acontecimento involuntário e imprevisto, pelo que na minha perspectiva deve também considerar-se mais uma das propriedades emergentes do sistema.

Tendo-se concluído que o sistema rodoviário constitui um sistema complexo, seguindo os preceitos da teoria da complexidade, efectuou-se uma proposta de representação sintética através da sua modelação. O processo de modelação partiu da observação macro das entidades de alto nível do sistema, ou seja, das propriedades emergentes da mobilidade individual, do trânsito colectivo e do conflito rodoviário, para de seguida identificar as entidades de baixo nível, a saber: os factores via, ambiente, veículo e humano. Estes factores foram caracterizados pelas suas variáveis de estado elementares, às quais foram atribuídas valores escalares parametrizados de acordo com o conhecimento científico, técnico e empírico existentes. A interacção das partes do sistema foi modelada pela interacção individual do condutor com o próprio veículo, com a via e com o ambiente, através do processo de condução. Esta proposta centra-se na modelagem individual dos agentes, mas construída na perspectiva do programador, com o fim de fornecer a informação considerada necessária para futuras simulações computacionais orientadas para o conflito rodoviário emergido da interacção do sistema. Este passo constitui o objectivo principal desta dissertação, ou seja, propor uma metodologia alternativa de estudo do fenómeno da sinistralidade rodoviária, numa perspectiva de saúde pública, com vista a ultrapassar os constrangimentos e as fragilidades identificados; conhecer melhor o funcionamento do sistema; identificar outras propriedades

emergentes; identificar os factores de risco que potenciam o conflito rodoviário, bem como as suas causas e, por fim, determinar que medidas preventivas poderão estabelecer melhores padrões de segurança rodoviária.

Contudo, constituindo esta metodologia de uma nova forma de estudo fenomenológico, considerou-se necessário fazer uma referência à simulação computacional, aos processos de simulação e ao estado da arte da simulação computacional de ambientes rodoviários.

As pesquisas sobre simulações computacionais de ambientes rodoviários revelaram que este tipo de simulação rodoviária é uma matéria que vem sendo tratada com bastante ênfase desde a década de 50. Neste percurso foram apresentadas centenas de algoritmos na tentativa de traduzir a movimentação dos veículos nas mais diversas situações rodoviárias do dia-a-dia. Estes algoritmos, no entanto, dadas as características físicas do contexto em que decorrem, são divididos em três algoritmos fundamentais, designados como “seguimento em fila”, “mudança de via” e “tempo para execução da acção”. Uma vez que se tratar de simular veículos, estes têm de obedecer a um conjunto de regras fundamentais associadas às regras de trânsito, e por isso os três algoritmos acima referidos são uma presença comum em praticamente todos os modelos de simulação identificados. Embora com algumas diferenças entre eles, estes não são mais que algoritmos que pretendem descrever o comportamento dos veículos em circulação, seja no seu movimento em fila numa via, seja aquando da mudança de via, assim como o tempo gasto quando se tenciona efectuar uma mudança de via ou uma manobra.

A avaliar pela rapidez com que as mudanças surgiram nesta área nos últimos anos, é de admitir que a simulação continue a tornar-se uma ferramenta cada vez mais essencial em muitas áreas tradicionais, e até em muitas outras em que até há bem pouco tempo poderia parecer pouco provável a sua utilização. Recentemente os modelos de simulação baseados em agentes têm assumido um papel de relevo, pois permitem uma boa estruturação e modelação em situações de elevada complexidade, para as quais a construção de modelos se assumia como uma tarefa gigantesca.

No âmbito da análise dos diversos trabalhos sobre simulação rodoviária baseada em agentes, foi feito um apanhado das suas características mais importantes, tendo-se destacado em particular o trabalho de Kai Nagel, porque, para além de comportar um vasto background teórico, aborda os conceitos deste tipo de simulação do ponto de vista da programação.

Todavia, feita uma análise comparativa das simulações apresentadas, observou-se que todas se orientam para obter melhores performances rodoviárias, relacionadas sobretudo com a fluidez rodoviária, quer solucionando problemas de congestionamento, quer tratando de melhorar as suas performances. Algumas abordam também o problema de acidentes ocorridos entre veículos. Porém, não foram encontradas referências explícitas ao objectivo de simular o ambiente rodoviário numa perspectiva de saúde pública, para pesquisar as causas dos conflitos rodoviários resultantes de acidentes de viação.

Assim, conclui-se que as metodologias e ferramentas aqui apresentadas poderão ser instrumentos poderosos para o estudo profundo das causas do conflito rodoviário e do fenómeno da sinistralidade rodoviária

Como se pôde verificar, o objectivo principal do presente trabalho prendeu-se com o primeiro passo a dar em direcção à simulação computacional do sistema rodoviário na perspectiva da saúde pública. Para este efeito efectuou-se uma vasta pesquisa no sentido de concentrar a maior informação possível acerca do sistema rodoviário e do conflito emergido das suas interacções. Assim, como recomendação para trabalhos futuros posso indicar exactamente a necessidade de simular o modelo ora proposto. Embora este modelo se destine a fins de saúde pública, possui potencialidades que podem servir outros fins, como sejam a avaliação dos riscos de ocorrência de acidentes de acordo com as características dos condutores e as regiões onde habitualmente circulam, a orientação e o ajustamento da formação técnica e prática da condução, o estabelecimento de graus de severidade dos ferimentos face à tipologia de acidente, a introdução de mecanismos de alerta nos veículos e a identificação de zonas sensíveis na infra-estrutura rodoviária, quer em fase de projecto quer para efeitos de remodelação.

Como simples exemplo demonstrativo de uma possível simulação computacional do sistema rodoviário apresenta-se no Apêndice 1 uma simulação multi-agente de um modelo do sistema designado por “O Trevo”, cujos resultados não foram explorados devido ao meu limitado conhecimento sobre programação, pelo que lhe faltam o rigor e a validação devidas.

Parafraseando a citação inicial, devo referir que a minha mente jamais voltará ao seu tamanho original devido ao enriquecimento cognitivo que este trabalho me ofereceu, quer no domínio das ciências da complexidade, quer no que concerne ao fenómeno da sinistralidade rodoviária.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANSR. Autoridade Nacional de Segurança Rodoviária: *Relatório Anual sobre a Sinistralidade Rodoviária*. Observatório de Segurança Rodoviária. Lisboa. 2007.
- ANSR. Autoridade Nacional de Segurança Rodoviária. *Relatório Anual de Sinistralidade*. Lisboa. 2008.
- AASHTO. *A policy on geometric design of highway and streets*. AASHTO, Washington D.C., 1984.
- AXELROD, R. (1997): *Resources for Agent-Based Modeling*, Published as Appendix B of Robert Axelrod, *The Complexity of Cooperation: Agent-Based Models of Competition and Collaboration*. Princeton, NJ: Princeton University Press. Disponível em: <http://www.modelingcomplexity.org/pols490/Resources.pdf>
- AXELROD, R. and COHEN, Michael. *Harnessing Complexity: organizational implications of a scientific frontier*. FP. New York, 1999.
- AXELROD, R (2003) “*Advancing the art of simulation in the social sciences*”, Japanese Journal for Management Information Systems. <http://www-personal.umich.edu/~axe/research/AdvancingArtSim2003.pdf>. em Julho 2008.
- BALAN, G.; Cioffi-Revilla, C.; Luke, S.; Panait, L. and Paus, S.: *A Java Multi-Agent Simulation Library*. 2003.
- BALMER, M. (2004) “*Agent-Based Activities Planning for an Iterative Traffic Simulation of Switzerland – Activity Time Allocation*”, Conference paper STRC 2004.
- BAKER, J. Stanard et al.: “*Traffic Accidents Investigator’s Manual for Police*”. Traffic Institute of Northwestern University. Evanston (Illinois) USA (1957).
- BAR-YAM, Yanner. *Dynamics of Complex Systems*. Perseus Books. Massachusetts, 1997.
- BARANGER, Michel. *Chaos, complexity and entropy: a physics talk for non- physicists*. Massachusetts Institute of technology and New England complex systems institute, Cambridge, London, 1999.
- BARROS, A.M., Loureiro, C.(1995). *Avaliação das Atitudes e da Intencionalidade dos Condutores em Cometer Transgressões. Análise Psicológica*. P 343-347.
- BIVAR, F.; SANTOS, J.; SANTOS, M.; DINIS, A.: *Percepção Visual e Condução Automóvel*. VIº Congresso Médico Nacional dos Hospitais Distritais. Lisboa. 2004.
- BORREL, J.; Algaba P.; Martinez, J. *Investigação de Accidentes de Trafico*. Dirección Geral de Tráfico (1991). NISB 129-91-014-X.
- BRUCE, K.B., Cardelli, L., Pierce, B.C.: *Comparing Object Encodings*. In: Abadi, M., Ito, T. (eds.): *Theoretical Aspects of Computer Software*. Lecture Notes in Computer Science, Vol. 1281. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York (1997) 415–438
- EDMONDS, B. (1999). *Syntactic Measures of Complexity*. Doctoral Thesis, University of Manchester, Manchester, UK.
- CAMPOS, V. – *Normas técnicas para projecto de urbanização*. Lisboa, LNEC, 1993.
- CARDOSO, J.: *Curso de Gestão e Segurança Viária Urbana: Factores de Dimensionamento Físico da Via*. Prevenção Rodoviária Portuguesa. 1999.
- CARE. *Annual Statistical Report*. European Road Safety Observatory. Directorate General Energy and Transport UE. 2006.
- CASTI, Jonh. *Complexification: Explaining a paradoxical World through the science of surprise*. HarperCollins, New York, 1994.
- CARE. *Community Database on de Accidents on the Roads in the Europe (CARE): Annual Statistical Report*. Directorate General Energy and Transport. U.E. 2006.
- COVENEY, P., Highfield, R. (1995) *Frontiers of complexity: the search for order in a chaotic world*. Ballantine Books, New York.
- CHAMPION, A. et al.: “*Behavioral Road Traffic Simulation with ARCHISIM*”, Proceedings of Summer Computer Simulation Conference. Orlando, USA, 2001

- CHENISBEST, B., Jahn, N., Coz, J.: *European Accident Causation Survey Methodology*. European Road Safety Federation. European Automobile Manufacturers Association. European Commission. 1997.
- CUNHA, G., Brito, B., Leal, A., Torgal, J.: *Sinistralidade rodoviária - contextualização e análise*. Revista de Estudos Demográficos, Instituto Nacional de Estatística. Lisboa. 2007.
- Decreto-Lei nº 554/99, de 16 de Dezembro: *Inspecção Periódica Obrigatória de Veículos*. Lisboa. Governo Português. 1999
- Decreto-Regulamentar nº 22-A, *Regulamento de Sinalização do Trânsito*. Governo Português. Lisboa. 1998.
- DONÁRIO, A, op cit in Reto, L., Queirós, J., Sá, L. *Estudo de Situação do Fenómeno da Sinistralidade Rodoviária em Portugal*. Instituto Superior Técnico e Autoridade Nacional de Segurança Rodoviária. Lisboa. 2007
- DRIVINGVISION: <http://www.sdt.com.au/DRIVINGVISION.htm>: *Informação sobre a influência da velocidade no campo de visão*. Acedido em 20 de Agosto de 2008.
- DROGOUL, A., Ferber, J. (1992) *Multi-Agent Simulation as a Tool for Modeling Societies: Application to Social Differentiation in Ant Colonies*. Disponível em: <http://www-poleia.lip6.fr/~drogoul/papers/Drogoul.Maamaw92.pdf>
- EHLERT, P. and Rothkrantz, L. (2001), "Microscopic traffic simulation with reactive driving agents", *Intelligent Transportation Systems*, 2001. Proceedings. 2001 IEEE.
- ERSF - Intersafe. *Tecnical guide on road safety for interurban roads*. ERSF, Brussels, 1996.
- FRIKE, L.B.; Baker, S.: *The Traffic-Accident Investigation Manual. At scene investigation and technical follow-up*. Nona edição. Northwestern University Traffic Institute. Evanston (Illinois) USA (1986).
- GELL-MANN, Murray. *O Quark e o Jaguar: as aventuras no simples e no complexo*. Tradução: Alexandre Tort. Rio de Janeiro, ROCCO, 1996.
- GINO, Francesca. *Complexity measures in decomposable structures*. In: EURAN – European Academy of Management – Conference on Innovative Research in Management. May, 2002. Stockholm, Sweden.
- GORDON, D.A.; McGee, H.W.; Hooper, K.G. – *Driver characteristics impacting highway design and operations*. In *Public Roads*, Vol 48, Nº 1, June 1984.
- GRIMM et al. *A standard protocol for describing individual-based and agent-based models*. *Ecological Modelling*, num. 198, pp.115-126, 2006.
- HADDON J.W. *Advances in the epidemiology of injuries as a basis for public policy*. *Public Health Report*, 1980, 95:411-421.
- HENDRICKS, D., Feel, J., Freedman, M.: *The Relative Frequency of Unsafe Driving Acts in Serious Traffic Crashes*. Traffic Safety Programs. National Highway Traffic Safety Administration. U.S. Department of Transportation. 2001.
- HEYLIGHEN, Francis. *Building a science of complexity*. *Annual Conference of the cybernetics Society*. London, 1988. Disponível em: <http://pespmc1.vub.ac.be/POSBOOK.html>. Acesso em: 20 de set.2007.
- HEYLIGHEN, Francis. *The growth of structural and functional complexity during evolution*, in: F. Heylighen, J. Bollen & A. Riegler (eds). *The Evolution of Complexity* (Kluwer Academic, Dordrecht), p. 17-44. 1998. Disponível em: <http://pespmc1.vub.ac.be/POSBOOK.html>. Acesso em: 15 de Maio 2007.
- HOLLAND, Jonh H. *Hidden: How adaptation builds complexity*. Perseus books, Cambridge, Massachusetts, 1995.
- KAUFFMAN, S.A. *The Origins of Order: self-organization and selection in evolution*, Oxford University press, New York, 1993.
- IRTAD. *Definitions and Data Availability*. OCDE Road Transport Research Programme. 1998.
- KRUG E.G., Sharma, GK, Lozano R. *The global burden of injuries*. *American Journal of Public Health*, 2000, 90: 523-526.
- J.A.E. *Norma de traçado*. Junta Autónoma de Estradas, Almada, 1994.
- JAMES, Green: *Forensic Engineering Analysis of Total Reaction Time*. *Jornal of the Nacional Academy of Forensic Engineers*, Vol XX, Nº. 1, Jun 2003.

- LAW, A. and Kelton, W. (2000), “*Simulating Modelling and Analysis*”. McGraw-Hill; 3º rd ed, ISBN 0-07116537-1
- LE MOIGNE, Jean-Louis. *A teoria do sistema geral: teoria da modelização*. Tradução: Jorge Pinheiro: Instituto Piaget. Lisboa. 1977.
- LEAL, P., Brito, B., Marcelino, L., Batista, J.: *Estudo Estatístico sobre as Causas da Sinistralidade Rodoviária com Vítimas Mortais*. Seminário Internacional de Segurança Rodoviária. Lisboa (2006).
- LEITE, M. *Proposta de uma Modelagem de Referência para Representar Sistemas Complexos*. Tese de Doutoramento. Florianópolis. 2004.
- Lei nº 59/2007, de 04 de Setembro: *Código Penal Português*. Governo Português. Lisboa. 2007.
- LOIC. *Lei da Organização da Investigação Criminal*, Lei 21/2000, de 10 de Agosto. Lisboa. Governo Português. 2000.
- LNEC. Laboratório Nacional de Engenharia Civil: *Velocidades Praticadas pelos Condutores nas Estradas Portuguesas*. Lisboa. 2004.
- MONTORO, L. et al.: *Manual de Seguridad Vial: El factor humano*. Universidade de Bogotá. Colombia. 2002.
- MARC, Gren. *How Long Does It Take To Stop?*. Methodological Analysis of Driver Perception-Brake Times. *Transportation Human Factors*, 2, pp 195-216, 2000.
- MERCY J. A. e tal. *Public health policy for preventing violence*. *Health Affairs*, 1993: 7-29.
- MINAYO, M.C. de Souza. *O desafio do conhecimento*. São Paulo: Hucitec. 1993.
- MORIN, Edgar. *O método 1: da natureza da natureza*; Tradução: Ilana Heineberg. 2ª edição. Porto Alegre: v. 1, Sulina, 1977.
- MURRAY, CJL, Lopes, AD. *The global burden of disease: A comprehensive assessment of mortality and disability from diseases, injuries and risk factors in 1990 and projected to 2020*. Boston, MA. Harvard School of Public Health, 1996.
- NHTSA. National Highway and Safety Administration. <http://www.nhtsa.dot.gov/>. Acedido em 15 de Maio de 2008.
- NAGEL, K. (2004) “*Multi-agent transportation simulations, draft-in-progress for a book*”, Livro online em <http://www.vsp.tu-berlin.de/archive/sim-archive/publications/book/>, Agosto (2005).
- NSRA – *Guidelines for the geometric design of urban roads*. Stockholm, NSRA, 1973.
- OMS. Organização Mundial de Saúde: *Relatório Mundial sobre a Prevenção dos Traumatismos Causados pelo Trânsito* (2004). <http://www.oms.com>.
- PEDEN M e tal. *World Report on Road Traffic Injury Prevention*. Geneve, World Health Organization, 2004.
- POCINHO, A. (2007): *Uma Biblioteca de Simulação Baseada em Agentes para o Estudo de Fenómenos de Congestionamento Rodoviário*. Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Informática. ISCTE. Lisboa.
- PELZ, G. (2003). *Mecatronic Systems, modelling and simulation with HDLs*. John Wiley & Sons Ltd.
- RIVERS, R.W., “*Traffic Accident Investigator’s Manual*”, Charles C. Thomas, LTD, 1995.
- RETO, L, Queirós, J., Sá, L. *Definição da Estratégia Nacional de Segurança Rodoviária*. Instituto Superior Técnico e Autoridade Nacional de Segurança Rodoviária. Lisboa. 2008.
- ROLAND, D. e Parot, F.: *Dicionário de Psicologia*. CLIMEPSI Editores. Lisboa. 2001.
- SANDERS, T.I., McCabe, J.A.: *The Use of Complexity Science. A Survey of Federal Departments and Agencies, Private Foundations, Universities, and Independent Education and Research Centers. A Report to the U.S. Department of Education*. 2003.
- SCHILPEROORD, M. *Complexity in Foresight. Experiences with Intersections: An Agent-Based Simulation Workbench to Help Achieve Adaptativeness in Strategic Planning*. Tese de Doutoramento. Lisboa. 2004.
- SIMON, Herbert. *As ciências do artificial*. Tradução: Luís Moniz Pereira. Coimbra-Lisboa. Sucessor, 1969.
- SHINAR, D. *Traffic Safety and Human Behavior*. Elsevier. 2007.

- SNOWDEN, Dave. *A nova forma de ser simples*. HSMmanagement, n° 39, ano 7, volume 4, p.98-106, jul-ago 2003. Traduzido de: Knowledge Management.
- STACEY, Ralph D. *Complexity and creativity in organizations*. BK, San Francisco, 1996.
- TAYLOR, S.J., and Bogdan. *Introduction to Qualitative Research Methods*. New York: Wiley , 1998.
- TOBIAS, R. and Hofmann, C. (2004) - *Evaluation of free Java-libraries for social-scientific agent based simulation*, Journal of Artificial Societies and Social Simulation vol. 7, no. 1; <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/7/1/6.html> em 12/05/2005
- WALDROP, M. Mitchell. *Complexity: the emerging science at the edge of order & chaos*. Simon and Schuster, New York, 1992.
- WOOLDRIDGE, M. (2002) *An introduction to Multiagent Systems*. John Wiley & Sons Ltd: Chichester, England. 348p.
- HENRIKSSON, W; Stenlud, T.; Sundstrom, A.; Wiberg, M. *Proceedings From the Conference: The GDE-Model as a Guide in Driving Training and Testing*. Umea University. 2007.
- WILENSKY, U., 1997. NetLogo Traffic Basic model.
<http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/TrafficBasic>. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, Evanston, IL.
- WILENSKY, U., 1998. NetLogo Traffic Intersection model.
<http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/TrafficIntersection>. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, Evanston, IL.
- WILENSKY, U., 1998. NetLogo Traffic 2 Lanes model.
<http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/Traffic2Lanes>. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, Evanston, IL.
- WILENSKY, U., 2003. NetLogo Traffic Grid model.
<http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/TrafficGrid>. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, Evanston, IL.
- WU, J.: *Modeling Complexity Ecological System: an introduction*. In: *Ecological Modelling*. p.1-6, 2002. www.Elsevier.com/locate/ecomodel. Disponível em 08/06/2004. Acesso em 23 de Junho de 2008.
- UTCA Report 02217, June 2004, *Traffic Simulation Software Comparison Study*, disponível em http://utca.eng.ua.edu/projects/final_reports/02217fnl.pdf , Fevereiro 2008.
- VAN WAVEREN, R.H., Groot, S., Scholten, H., Van Geer, F., Wösten, H., Koeze, R. & Noort, J. *Good Modeling Practice Handbook*. STOWA, Utrecht, RWS-RIZA, Lelystad, The Netherlands. 2000.
- VILLEGAS, Oswaldo Ramon Teran. *Emergent tendencies in multi-agent-based simulations using constraint-based methods to effects practical proofs over finite subsets of simulation outcomes*. Thesis doctored. Centre for policy modellig the Manchester Metropolitan University, 2001.

APÊNDICES

“...introduce a new kind of science that is based on the much more general types of rules that can be embodied in simple computer programs.” (Stephen Wolfram, 2002)

Apêndice 1

SIMULAÇÃO MULTI-AGENTE DO SISTEMA RODOVIÁRIO

Modelo de Emergência “O TREVO”

Neste apêndice vou efectuar uma simples demonstração de uma possível Simulação Multi-Agente do Modelo de Emergência do Sistema Rodoviário, aqui designado por “O TREVO” (MET). Este modelo de emergência foi construído a partir da modelação geral do sistema rodoviário realizada no capítulo 6. A designação de “O TREVO”, deste modelo de emergência, resulta do facto do sistema rodoviário ser um sistema quadripartido o que, representado pela modelação e pela imagem gráfica da simulação, configura o aspecto da planta do Trevo, que embora na realidade esta possua apenas três folhas, porém, o adágio popular refere que tratando-se do Trevo da sorte terá quatro. Apesar da máxima de que “*a sorte dá muito trabalho*”, o autor não enjeitou o adágio popular. Com o presente modelo pretende-se apenas desenvolver um protótipo simples de uma simulação computacional do sistema rodoviário.

1. Objectivos

A descrição da presente simulação será organizada e apresentada de acordo com o articulado proposto pelo protocolo de Grimm e al (2006) designado por “Overview, Design concepts and Detail” (ODD). Este protocolo ODD tem por objectivo uniformizar a descrição de modelos de simulação social. A simulação computacional do Modelo de Emergência “O Trevo” (MET) pretende ser apenas um simples teste demonstrativo da Simulação Social Baseada em Agentes (SSBA) e da metodologia de experimentação laboratorial (Multi-Agente) adoptada pelas Ciências da Complexidade. O MET foi construído a partir de algumas das variáveis de estado elementares do sistema rodoviário com o fim de simular as suas interacções, de se observarem as propriedades de emergência de mobilidade e de trânsito e por fim verificar a ocorrência de conflitos entre os agentes, ou seja, a ocorrência de *acidentes* que interrompam aquelas propriedades emergentes.

A calibração do modelo é feita com a utilização dos dados científicos, técnicos e empíricos conhecidos. O objectivo final desta demonstração experimental visa criar um cenário virtual

que represente um cruzamento de vias rodoviárias e através da sua simulação computacional contabilizar os acidentes resultantes da interação entre os agentes.

1.1. Variáveis de estado e escalas

O MET é estruturado pelas entidades de baixo nível compostas por três agentes, que compreendem os subsistemas rodoviários, designadamente, a via, o ambiente, e o humano (associado ao veículo no papel de condutor) e pelas respectivas variáveis de estado.

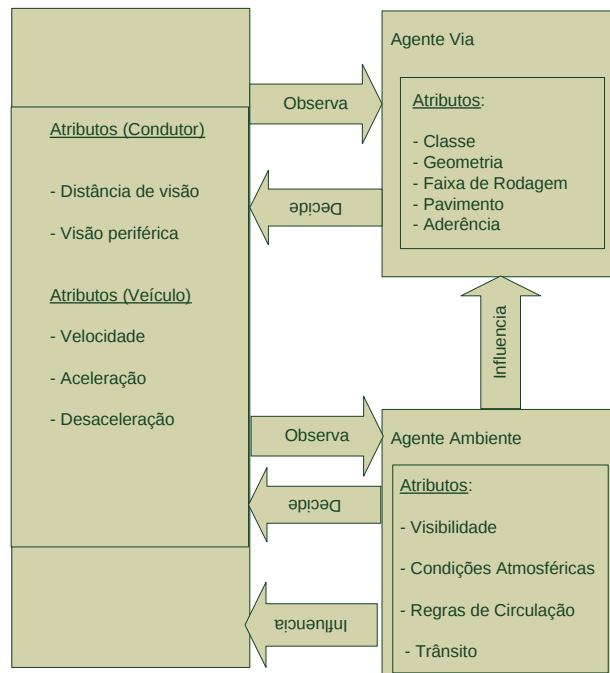


Figura 1.1 – Diagrama dos agentes, dos seus atributos e das suas interações.

Os valores escalares aplicáveis às variáveis de estado são os que se descrevem na tabela seguinte.

Quadro 1.1 – Variáveis de estado e respectivos valores escalares do MET.

Agentes	Atributos	Variáveis	Escalas	OBS
Via	Classe	E.N.	2 vias	Forma de cruz
	Geometria	Cruzamento	+	
	Faixa de rodagem	Largura	3 m	
	Trânsito	Sentidos	1	
	Pavimento	Asfalto	Usado	
	Aderência	Seco	0,55-0,70	
	(Coef. Atrito	Molhado	0,40-0,65	
Ambiente	Visibilidade	Dia	300 m	Distância
		Noite	30 – 100 m	
	Cond. Atmosféricas	Sem Chuva	Seco	
		Com Chuva	Molhado	
	Regras	Regra da prioridade	À direita	
Condutor e Veículo	Velocidade	Verificada	0 – 100 km/h	Aleatória
	Aceleração	Positiva	1 - 2 m/s ²	
	Desaceleração	Seco	5,4 – 6,8 m/s ²	
		Molhado	3,9 – 6,4 m/s ²	
	Percepção visual	Dia	300 m	
		Noite	30 – 100 m	
		Periférica	20° - 120°	

As entidades de alto nível que se esperam observar são a população de agentes a interagir individualmente com o ambiente e colectivamente, dando origem à mobilidade individual, ao trânsito colectivo e ao fluxo de tráfego. Paralelamente, em resultado da interacção colectiva espera-se observar conflitos de trânsito.

1.2. Processo geral de planificação

1.2.1. Individual

Na simulação pretende-se que cada agente (condutor), através dos seus atributos:

- Dirija o seu próprio veículo pela via nos sentidos da esquerda para a direita e de baixo para cima, praticando uma velocidade aleatória mínima de 0 e máxima de 100 km/h;
- De percepção visual - observe o ambiente à sua frente, de acordo com as condições ambientais, ou seja, de distância de visibilidade (dia ou noite);
- De acção – o condutor decide movimentar-se (acelerando) ou parar (desacelerando), de acordo com o espaço livre à sua frente e com a aderência da via (seco ou molhado).

1.2.2. Colectivamente

Colectivamente os agentes deslocam-se pela via de trânsito, procurando sempre evitar ocupar a mesma unidade de espaço em simultâneo, ou seja, evitando colidir entre si ao longo da mesma via e na intersecção de vias. Na intersecção de vias o trânsito funciona alternadamente de acordo com a regra de prioridade ao trânsito da direita.

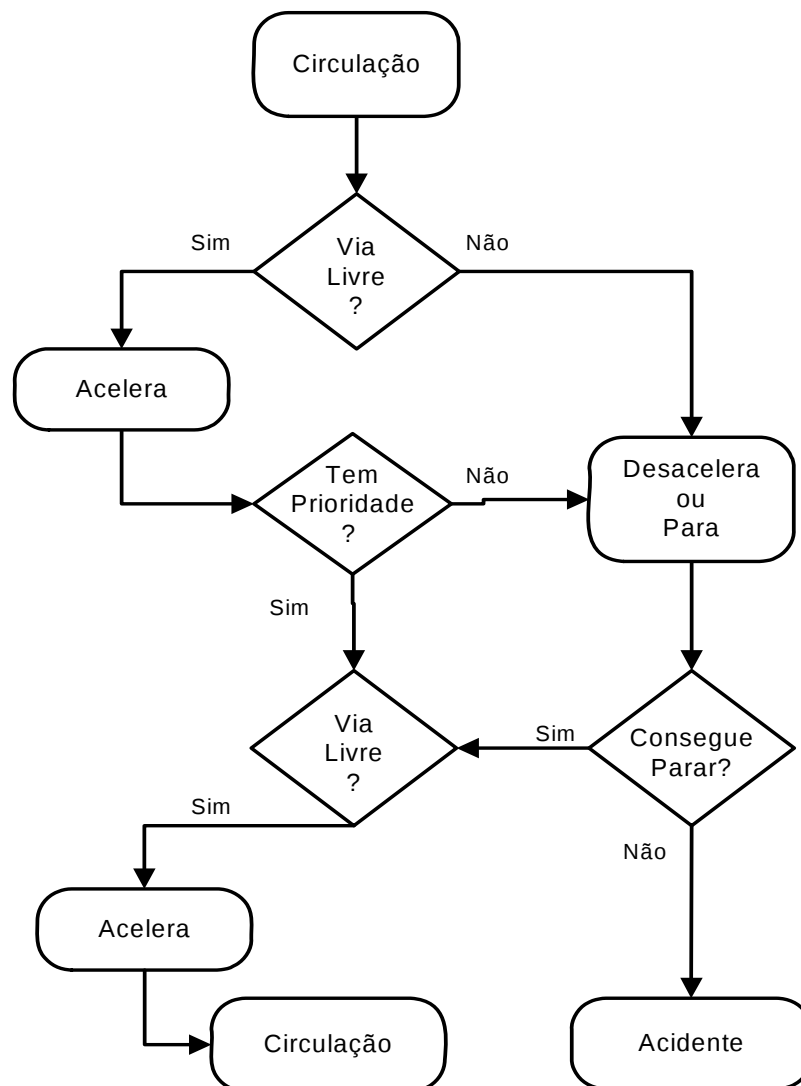


Figura 1.3 – Diagrama de fluxos da interacção dos agentes.

1.2.3. Modelação do tempo e do espaço

A modelação do tempo e do espaço é composta por (“time-steps”) discretos e é medida em metros por segundo. Na simulação cada “patche” corresponde a uma dimensão espacio-temporal de 2,5 m/s. Assim, o comprimento total de cada via é de 1000 m.

1.2.4. Conceitos de design

- Emergência – Os fenómenos de emergência antecipadamente conhecidos são a mobilidade individual e o trânsito colectivo. Todavia, desconhece-se sobre se vão ocorrer conflitos espaciais entre os agentes (acidentes).
- Adaptação – Os agentes devem adaptar a sua velocidade de deslocação face ao espaço livre à sua frente e às condições ambientais, de acordo com a sua variação, em termos de distância de visibilidade e de aderência do pavimento.
- Previsão – Os agentes não prevêem o futuro, apenas o observam o ambiente e reagem de modo a evitar colidir com outros agentes.
- Conhecimento – Os agentes decidem de acordo com o conhecimento que têm das regras de interacção, ou seja, de não colidir e de dar prioridade aos veículos que observarem à direita.
- Interações – Os agentes interagem individualmente com a via, com o ambiente e com o seu próprio veículo e colectivamente com os outros agentes.
- Estocacidade – Os valores da velocidade são aleatórios.
- Colectivo – Os agentes não estão organizados em grupos, agem apenas individualmente.
- Observação – O modelo pode ser observado directamente, a partir da visualização da simulação, ou indirectamente, através da colecção de dados reunidos durante cada simulação.

1.2.5. Inicialização

A simulação permite a observação directa e indirecta do modelo. Na observação directa, o observador selecciona as variáveis de estado e os valores escalares de acordo com os seus objectivos de observação. Na observação indirecta, a simulação testa automaticamente as variáveis de estado seleccionadas cruzando todos os seus valores escalares.

Todos os valores escalares são baseados em dados científicos, técnicos ou empíricos.

1.2.6. Entradas

As entradas possíveis prendem-se com a manipulação das seguintes variáveis de estado, nos “Sliders” do simulador:

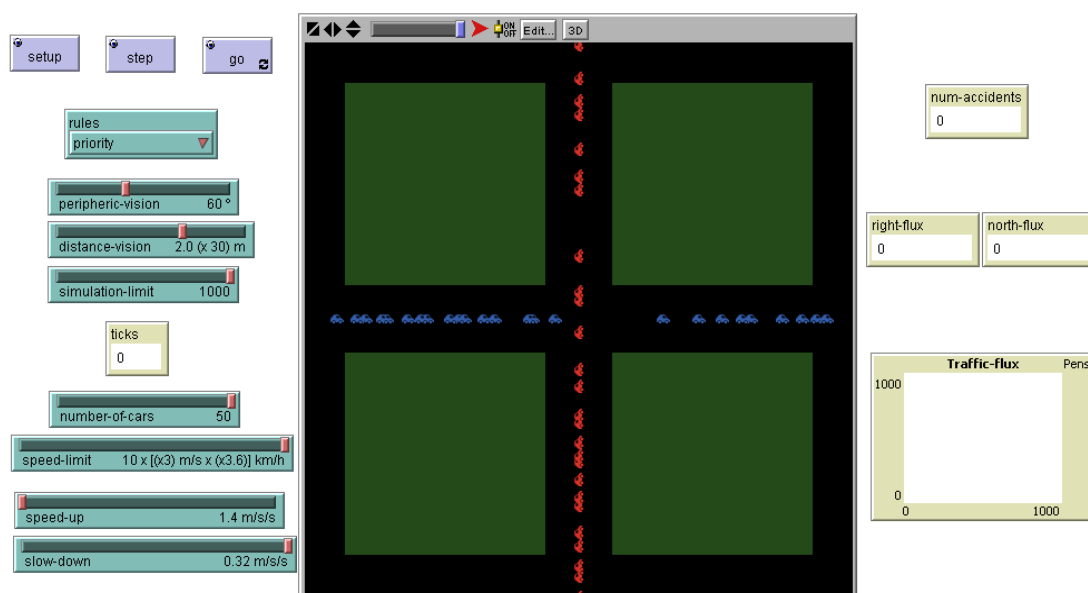
- Regras de interacção, com prioridade ou sem prioridade (Rules);
- A distância de visibilidade, maior ou menor de acordo com o dia e a noite (Distance-vision);
- A visão periférica, com maior ou menor grau de abertura (Perpheric-vision);

- O número de elementos em interação (Number-of-cars)
- A velocidade máxima dos agentes, maior ou menor (Speed-limit);
- A aceleração dos veículos (Speed-up);
- A desaceleração, em resultado da aderência do pavimento, estando molhado ou seco (Slow-down).

Estas variáveis podem ser manipuladas pela selecção dos seus valores parametrizados, fazendo deslizar o cursor dos “sliders” do simulador, conforme se pode observar na fig.1.4.

Para o efeito, é necessário instalar o programa “NetLogo 3.1.5”, que se encontra na pasta da Simulação contida no CD em anexo à dissertação. Seguidamente, abrir o modelo designado por “O TREVO”

Figura 1.4 – Imagem gráfica do simulador.



1.3. Linguagem de programação do modelo “O TREVO”

A linguagem de programação do MET é o “NetLogo”. O “NetLogo” é um ambiente de modelação programável para explorar o comportamento de sistemas descentralizados e sistemas complexos. É particularmente bem aplicado na modelação de sistemas complexos. O “NetLogo” fornece um modo fácil de começar a modelação baseada em agentes, mesmo para aqueles que não têm avançada habilidade em programação e matemática. Este tipo de ambiente é composto de três tipos de agentes, sendo: *turtles*, *patches* e *observer*. Os

modeladores podem dar, simultaneamente, instruções a centenas ou milhares de “agentes” independentes que trabalham paralelamente, tornando possível explorar as conexões entre o comportamento de micro-níveis e os de modelos de macro-níveis que emergem das interações de muitos indivíduos. O “NetLogo” usa uma linguagem de modelação própria, derivada da linguagem de programação “Logo” do Media Lab – MIT. O “Netlogo” é uma ferramenta de acesso e uso gratuito e está disponível no seguinte site: <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>.

1.3.1. Programação em “NetLogo”

A programação em NetLogo consiste basicamente em atribuir acções a três grupos de entidades: o observador (*observer*) e os agentes (*turtles* e *patches*), que representam os agentes (*turtles*) e o ambiente (*patches*). O observador é o “programador” que especifica as condições de funcionamento e controla os demais elementos.

A linguagem de programação do NetLogo apresenta vários recursos, tais como: atribuir diferentes formas (*shapes*) aos agentes (*turtles*) que podem ser seleccionados na biblioteca do ambiente ou criados pelo próprio usuário através de uma janela de edição de formas. A programação NetLogo também permite definir diferentes espécies (*breeds*) de agentes, sendo uma característica importante, pois uma vez que tenha definido as espécies, torna-se possível programar para que essas tenham comportamentos diferenciados. Por exemplo, num modelo de simulação presa/predador, definidas as espécies denominadas “ovelha” e “lobo”, através da programação é possível escrever uma regra que faça o “lobo” comer as “ovelhas”. A diferenciação das espécies faz também com que o modelo fique visualmente atraente e esclarecedor, uma vez que se podem atribuir diferentes formas para diferentes espécies.

Feitas algumas pesquisas identificaram-se os mesmos algoritmos principais, referidos anteriormente, a que correspondem as seguintes simulações de ambientes rodoviários:

- Tráfego Básico (Traffic Basic)

Este algoritmo modela o movimento de veículos em auto-estrada com vista ao estudo do fenómeno da formação das filas de trânsito. Cada veículo segue um conjunto de regras simples: abandona a marcha se houver um veículo à sua frente ou acelera se tiver o espaço livre. Esta modelação demonstra como se formam as filas sem uma causa justificativa (Wilensky, U., 1997).

- Tráfego com Duas Vias no Mesmo Sentido (Traffic Two Lanes)

Este modelo visa também avaliar a formação de filas compactas de trânsito, tal como o anterior, porém, num ambiente mais sofisticado, formado por duas filas de trânsito (Wilensky, U., 1998).

- Tráfego em Intersecção de Vias (Traffic Intersection)

Neste modelo é representado um cruzamento de vias sinalizado por semáforos, onde circula veículos. O modelo destina-se a gerar intuições sobre a optimização do caudal rodoviário. Para o efeito é possível fazer variar o número de veículos em interacção, a sua velocidade e a regulação dos semáforos (Wilensky, U., 1998).

- Grelha de Tráfego (Traffic Grid)

Este modelo, tal como o modelo do “Traffic Intersection” procura optimizar a fluidez rodoviário através da regulação da sinalização semafórica, porém, numa rede de intersecções rodoviárias em forma de grelha (Wilensky, U., 2003).

1.4. Código do modelo de emergência “O TREVO”

```
globals [ticks num-accidents right-flux north-flux]
breed [cars car]
patches-own [ clear-in ]
cars-own [cars-in-sight mine-in-sight cars-in-front
          others-in-sight cars-in-right-sight
          cars-seen-ahead speed speed-min
          ]
```

```
.....
;;SETUP PROCEDURES;;
.....
```

```
to setup
  clear-all
  set ticks 0
  set right-flux 0
  set north-flux 0
  set num-accidents 0
  setup-road
  setup-cars
  set-current-plot "Traffic-flux"
```

```
end
```

```
to setup-road
  ask patches
  [ set pcolor green - 3
    if abs pxcor <= 2 or abs pycor <= 2
    [ set pcolor black ]
```

```

    if abs pxcor >= 18 or abs pycor >= 18
      [ set pcolor black ]
    ]
  end

to setup-cars

  set-default-shape cars "car"
  create-custom-cars number-of-cars / 2 [
    setxy random-xcor 0
    set heading 90
    set color blue
    set speed-min 0
    set speed speed-min ;+ random-float 10.0
    separate-cars
  ]
  set-default-shape cars "car1"
  create-custom-cars number-of-cars / 2 [

    setxy 0 random-ycor
    set heading 0
    separate-cars
    set color red
    set speed speed-min ;0. + random-float 10.0
    set speed-min 0
    separate-cars
  ]
  ask cars [set cars-in-sight cars with [color = pink]]
end

to separate-cars
  if any? other-cars-here
    [ fd 1
      separate-cars ]
  end
  .....
  ;;RUNTIME PROCEDURES;;
  .....
to go
  ifelse ticks < simulation-limit [step] [stop]
  plot-cars
end

to slow-down-car ;; turtle procedure
  set speed speed - slow-down
  if speed < 0 [set speed 0]
end

to speed-up-car ;; turtle procedure
  set speed speed-min + random-float 4.0 / 10

```

```

    if speed > speed-limit [set speed speed-limit]
end

to step
  move-cars
  check-accident
  set ticks ticks + 1
end

to move-cars
  ifelse rules = "without-rules"
    [ask cars [without-interruption [move-cars-without-rules] ] ]
  [ifelse rules = "priority"
    [ask cars [without-interruption [move-cars-priority]]]
    []]
end

to perception-without-rules
  set cars-in-sight (turtles in-cone distance-vision peripheric-vision) with [self != myself]
  set cars-seen-ahead (cars-on patch-ahead 1) with [pertence-a cars-in-sight-of myself]
  set others-in-sight cars-in-sight with [(color != color-of myself) and approaching?]
end

to move-cars-without-rules
  perception-without-rules
  if (not any? other-cars-here) [drive-without-rules]
  fd speed
end

to drive-without-rules
  ifelse (not any? cars-in-sight)
    [speed-up-car fd speed update-flux]
    [slow-down-car fd speed update-flux]
end

to move-cars-priority
  set cars-in-sight (turtles in-cone distance-vision peripheric-vision) with [(self != myself)]
  set cars-seen-ahead (cars-on patch-ahead 1) with [pertence-a cars-in-sight-of myself]
  set cars-in-right-sight cars-in-sight with [(seen-on-the-right myself) and (color != color-of myself) and approaching?]
  ;show cars-in-sight
  set cars-in-front cars-in-sight with [(color = color-of myself)]
  ifelse (not any? other-cars-here) and (not any? cars-in-right-sight) and (not any? cars-in-front) and (not any? cars-seen-ahead)
    [speed-up-car fd speed update-flux]
    [slow-down-car fd speed update-flux]
end

to update-flux
  ifelse color = blue

```

```

    [set right-flux right-flux + speed]
    [set north-flux north-flux + speed]
end

to-report pertence-a [agent-set]
    report member? (value-from self [who]) (values-from agent-set [who])
end

to-report approaching?
    report ((color = blue) and (xcor <= 0)) or ((color = red) and (ycor <= 0))
end

to-report seen-on-the-right [me]
    report ((180 + towards me) mod 360 >= (heading-of me)) and
        ((180 + towards me) mod 360 <= (heading-of me) + peripheric-vision / 2)
end

to check-accident
    ask patches with [pcolor = orange]
    [ set clear-in clear-in - 1
      if clear-in <= 0
        [ask cars-here [if not any? (cars-on patch-ahead 1)[ set pcolor black speed-up-car fd
speed]]]
      ]
    ask patches [
      if (count cars-here > 1) and (not (pcolor = orange))
      [
        set pcolor orange
        set clear-in 5
        set num-accidents num-accidents + 1
        plot num-accidents
      ]
    ]
end

to clear-accident
    ask patches with [pcolor = orange]
    [if (count cars-here > 1) [set pcolor black]]
end
.....
;;PLOTING PROCEDURES;;
.....
to plot-cars
    set-current-plot "Traffic-flux"
    ; set-current-plot-pen "Average Speed"
    ; plot (100 * (min values-from turtles [speed]) + (max values-from turtles [speed]) / 2)
    set-current-plot-pen "North-flux"
    plot north-flux / 1
    set-current-plot-pen "Right-flux"
    plot right-flux / 1

```

```
set-current-plot-pen "num-accidents"  
plot (10 * num-accidents)  
  
end
```

Apêndice 2

Terminologia Utilizada para Descrever o Sistema e a Sinistralidade Rodoviários.

Este apêndice destina-se a compilar a terminologia utilizada normalmente, pelas entidades oficiais, para descrever: o fenómeno da sinistralidade; as manobras dos condutores e da condução; as infra-estruturas rodoviárias; a sinalização; o tráfego rodoviário e o trânsito; e os veículos.

2.1. Terminologia relacionada com o fenómeno da sinistralidade

- 2.1.1. **Acidente**, genericamente considerado, “é um acontecimento fortuito ou eventual que altera a ordem das coisas e que involuntariamente origina danos às pessoas ou aos objectos” (Borrel Vives, 1991, Op. Cit. in P. 33-41).
- 2.1.2. **Acidente de viação**, conforme a definição portuguesa, é “uma ocorrência na via pública ou que nela tenha origem, envolvendo pelo menos um veículo, do conhecimento das entidades fiscalizadoras, e da qual resultem vítimas e/ou danos materiais” (ANSR, 2008).
- 2.1.3. **Acidentes com vítimas**, acidente do qual resulte pelo menos uma vítima.
- 2.1.4. **Acidente mortal**, é aquele em que uma ou mais pessoas falecem, existindo umnexo causal entre o acidente e a sua morte.¹
- 2.1.5. **Acidente com feridos**, é aquele, em que não existem vítimas mortais, contudo uma ou várias pessoas ficam feridas.²
- 2.1.6. **Acidentes com feridos graves**, acidente do qual resulte pelo menos um ferido grave, não tendo ocorrido qualquer morte.
- 2.1.7. **Acidente com feridos leves**, acidente do qual resulte pelo menos um ferido leve e em que não se tenha registado mortos nem feridos graves. E ainda, qualquer indivíduo que numa situação decorrente de um acidente de viação refira que, e não obstante não haver lesões visíveis, necessita de cuidados médicos.³
- 2.1.8. **Vítima**, ser humano que em consequência de acidente sofra danos corporais.

¹ Prevenção e Segurança Rodoviária, Texto Apoio A, Serviço Policial 2 MAI – MAI 2003

² Prevenção e Segurança Rodoviária, Texto Apoio A, Serviço Policial 2 MAI – MAI 2003

³ Prevenção e Segurança Rodoviária, Texto Apoio A, Serviço Policial 2 MAI – MAI 2003

- 2.1.9. **Morto ou vítima mortal**, vítima de acidente de viação cujo óbito ocorra no local do evento ou no seu percurso até à unidade de saúde. Para obter o número de mortos a 30 dias, aplica-se a este valor um coeficiente de 1,14 (Definição Internacional, Convenção de Viena).
- 2.1.10. **Ferido grave**, é aquele que em consequência de acidente de viação e após atendimento em serviço de urgência hospitalar por situação emergente careça de cuidados clínicos que obriguem a permanência em observação em serviço de urgência ou a internamento hospitalar⁴
- 2.1.11. **Ferido leve**, vítima de acidente que não seja considerada ferida grave.
- 2.1.12. **Condutor**, é toda a pessoa que conduza, um veículo motorizado, veículos de tracção animal, animais de carga e rebanhos na via pública ou nas vias equiparadas a via pública
- 2.1.13. **Passageiro**, é toda a pessoa que não seja condutor e se encontre sobre ou no interior do veículo.
- 2.1.14. **Peão**, é toda a pessoa que não seja condutor ou passageiro. Consideram-se peões, as pessoas transportadas em carrinhos de bebé, cadeira de rodas, que conduzam à mão velocípedes e ciclomotores, ou ainda que se desloquem sobre carris.⁵ É equiparado ao trânsito de peões a condução de carros de mão; a condução à mão de velocípedes de duas rodas sem carro atrelado e de carros de crianças ou de pessoas com deficiência; o trânsito de pessoas utilizando trotinetas, patins ou outros meios de circulação análogos, sem motor; o trânsito de cadeiras de rodas equipadas com motor eléctrico; a condução à mão de motocultivadores sem reboque ou retrotem.⁶
- 2.1.15. **Índice de gravidade**, número de mortos por 100 acidentes com vítimas.
- 2.1.16. **Indicador de gravidade**, $IG = 100 \times M + 10 \times FG + 3 \times FL$, em que M é o número de mortos, FG o de feridos graves e FL o de feridos leves.
- 2.1.17. **Ponto negro anual**, lanço de estrada com o máximo de 200 metros de extensão, no qual se registou, pelo menos, 5 acidentes com vítimas, no ano em análise, e cuja soma de indicadores de gravidade é superior a 20.⁷

⁴ Desp. 7537/2000 (2ª Série) de 16 de Março (Definição para efeito de submissão a exames, nº2 art 157 CE)

⁵ Prevenção e Segurança Rodoviária, Texto Apoio A, Serviço Policial 2 MAI – MAI 2003

⁶ Artº 104 CE

⁷ Prevenção e Segurança Rodoviária, Texto Apoio A, Serviço Policial 2 MAI – MAI 2003

2.1.18. **Zona de acumulação de acidentes:** Lanço de estrada com o máximo de 200 metros de extensão, no qual se registou, pelo menos 5 acidentes com vítimas.

2.2. Terminologia relacionada com as manobras dos condutores e a condução⁸

2.2.1. **Manobra:** Acção que altera a evolução ou posição anterior de um veículo.

2.2.2. **Direcção:** É um eixo rodoviário que une duas localidades ou partes, independentemente do sentido em que é feita a deslocação.

2.2.3. **Sentido:** É uma orientação da deslocação feita ao longo de uma direcção. Em cada direcção existem dois sentidos.

2.2.4. **Ultrapassagem:** Manobra que permite a um veículo passar da retaguarda para a frente de outro veículo que se move na mesma via de tráfego.

2.2.5. **Cruzamento de veículos:** Passagem de um veículo por outro veículo que se move na mesma via, mas em sentido contrário.

2.2.6. **Mudança de direcção:** Manobra executada por um veículo que circula em determinado sentido numa via, para passar a rodar noutra via de direcção diferente.

2.2.7. **Inversão do sentido de marcha:** Manobra executada por um veículo que circula em determinado sentido ou numa direcção ou via, para passar a circular na mesma via ou direcção no sentido oposto do iniciado.

2.2.8. **Cedência de passagem:** Direito conferido ao tráfego de uma via de ter a prioridade de passagem nos cruzamentos de nível com outras vias.

2.2.9. **Distância de visibilidade:** Extensão continua da via, que o condutor de um veículo pode ver de um dado ponto, quando a sua visão não é interceptada por outros veículos ou obstáculos.

2.2.10. **Visibilidade mínima:** Mínima distância de visibilidade de que necessita o condutor de um veículo que se move a uma dada velocidade para fazê-lo parar antes de atingir o obstáculo visto na faixa de rodagem. Por via legal o Código da Estrada estabelece que a visibilidade é reduzida ou insuficiente sempre que o conductor não possa avistar a faixa de rodagem em toda a sua largura numa extensão de, pelo menos 50 metros.⁹

2.2.11. **Tempo de percepção – reacção:** Lapso de tempo necessário ao condutor de um veículo para se aperceber de uma nova situação e reagir a ela.

⁸ Manual de Fiscalização de Trânsito. Brigada de Trânsito da GNR. Lisboa. 2005

⁹ Artº 19 CE.

- 2.2.12. **Distância de paragem:** Distância percorrida por um veículo que se pretende parar o mais rapidamente possível, medida entre o ponto em que o condutor toma consciência da necessidade de parar e o ponto de paragem. A distância de paragem inclui, portanto, a distância que é percorrida durante o tempo de percepção / recepção.
- 2.2.13. **Distância de travagem ou extensão de travagem:** Distância percorrida entre o ponto em que o condutor accionou o travão e este começar a produzir efeitos e o ponto de paragem.
- 2.2.14. **Distância de segurança:** Distância que o condutor deve manter em relação ao veículo que o precede, para evitar qualquer acidente em caso de súbita diminuição de velocidade ou paragem daquele veículo. É influenciada da pela capacidade do condutor, potência e estado de veículo e condições da via ou do tempo.
- 2.2.15. **Distância entre veículos** – O condutor de um veículo em marcha deve manter entre o seu veículo e o que o precede a distância suficiente para evitar acidentes em caso de súbita paragem ou diminuição de velocidade deste.¹⁰

2.3. Terminologia relacionada com as vias

Código da Estrada

- 2.3.1. **Auto-estrada:** via pública destinada a trânsito rápido, com separação física de faixas de rodagem, sem cruzamentos de nível nem acesso a propriedades marginais, com acessos condicionados e sinalizada como tal.
- 2.3.2. **Berma:** superfície da via pública não especialmente destinada ao trânsito de veículos e que ladeia a faixa de rodagem;
- 2.3.3. **Caminho:** via pública especialmente destinada ao trânsito local em zonas rurais;
- 2.3.4. **Corredor de circulação:** via de trânsito reservada a veículos de certa espécie ou afectos a determinados transportes;
- 2.3.5. **Cruzamento:** zona de intersecção de vias públicas ao mesmo nível;
- 2.3.6. **Eixo da faixa de rodagem:** linha longitudinal, materializada ou não, que divide uma faixa de rodagem em duas partes, cada uma afecta a um sentido de trânsito;
- 2.3.7. **Entroncamento:** zona de junção ou bifurcação de vias públicas;

¹⁰ Artº 18 CE

- 2.3.8. **Faixa de rodagem:** parte da via pública especialmente destinada ao trânsito de veículos;
- 2.3.9. **Ilhéu direccional:** zona restrita da via pública, interdita à circulação de veículos e delimitada por lancil ou marcação apropriada, destinada a orientar o trânsito;
- 2.3.10. **Localidade:** zona com edificações e cujos limites são assinalados com os sinais regulamentares;
- 2.3.11. **Parque de estacionamento»**, local exclusivamente destinado ao estacionamento de veículos;
- 2.3.12. **Passagem de nível:** local de intersecção ao mesmo nível de uma via pública ou equiparada com linhas ou ramais ferroviários;
- 2.3.13. **Passeio:** superfície da via pública, em geral sobrelevada, especialmente destinada ao trânsito de peões e que ladeia a faixa de rodagem;
- 2.3.14. **Pista especial:** via pública ou via de trânsito especialmente destinada, de acordo com sinalização, ao trânsito de peões, de animais ou de certa espécie de veículos;
- 2.3.15. **Rotunda:** praça formada por cruzamento ou entroncamento, onde o trânsito se processa em sentido giratório e sinalizada como tal;
- 2.3.16. **Via de abrandamento:** via de trânsito resultante do alargamento da faixa de rodagem e destinada a permitir que os veículos que vão sair de uma via pública diminuam a velocidade já fora da corrente de trânsito principal;
- 2.3.17. **Via de aceleração:** via de trânsito resultante do alargamento da faixa de rodagem e destinada a permitir que os veículos que entram numa via pública adquiram a velocidade conveniente para se incorporarem na corrente de trânsito principal;
- 2.3.18. **Via de sentido reversível:** via de trânsito afecta alternadamente, através de sinalização, a um ou outro dos sentidos de trânsito;
- 2.3.19. **Via de trânsito:** zona longitudinal da faixa de rodagem, destinada à circulação de uma única fila de veículos;
- 2.3.20. **Via equiparada a via pública:** via de comunicação terrestre do domínio privado aberta ao trânsito público;
- 2.3.21. **Via pública:** via de comunicação terrestre afecta ao trânsito público;

2.3.22. **Via reservada a automóveis e motociclos:** via pública onde vigoram as normas que disciplinam o trânsito em auto-estrada e sinalizada como tal;

2.3.23. **Zona de estacionamento:** local da via pública especialmente destinado, por construção ou sinalização, ao estacionamento de veículos.

Manual de fiscalização de trânsito

2.3.24. **Radial:** Via que liga directamente a parte central de uma zona urbanizada às áreas exteriores.

2.3.25. **Circular:** Via que contorna uma zona ou região, destinada a desviar o tráfego, total ou parcialmente, do respectivo centro ou centros. As circulares cortam naturalmente as vias radiais segundo ângulos aproximadamente rectos.

2.3.26. **Subsidiária:** Rua, avenida ou outra, utilizada no desdobramento do tráfego de uma via que existe nas proximidades e tem excesso de tráfego.

2.3.27. **Desvio:** Via que permite desviar o tráfego de passagem de determinada zona, ladeando-o de modo a facilitar o trânsito.

2.3.28. **Via de sentido único:** Via destinada a uma só corrente de tráfego.

2.3.29. **Via de duplo sentido:** Via destinada a duas correntes de tráfego com sentidos opostos.

2.3.30. **Via com prioridade:** Trecho de via, devidamente sinalizado, cujo tráfego tem prioridade de passagem em todos os cruzamentos com outras vias também sinalizadas.

2.3.31. **Plataforma:** Superfície final da terraplanagem ou via, compreendida entre as arestas superiores dos taludes de aterro ou as arestas internas das valetas laterais da via.

2.3.32. **Guia:** Elementos contínuos de betão, calçada ou outro material, implantada ao longo da faixa de rodagem, de nível com a sua superfície que delimita a faixa de rodagem.

2.3.33. **Lancil:** Elemento contínuo de cantaria, betão, calçada ou outro material, implantado ao longo da faixa de rodagem e sobrelevado em relação a esta.

2.3.34. **Separador:** Zona ou dispositivo (e não simples marca) destinado a separar tráfego do mesmo sentido ou de sentidos opostos. Os mais conhecidos são: o Separador New Jersey, o Separador portátil e o Separador metálico.

2.3.35. **Separador de sentidos:** Separador de duas correntes de tráfego de sentidos opostos.

- 2.3.36. **Separador de vias:** Separador de duas vias de tráfego do mesmo sentido e da mesma natureza.
- 2.3.37. **Separador lateral:** Separador de duas vias de tráfego, das quais uma é de acesso livre e a outra é de acesso controlado ou de grande trânsito.
- 2.3.38. **Guarda:** Dispositivo de protecção colocado ao longo da via a fim de evitar as consequências do despiste do veículo.
- 2.3.39. **Cruzamento a níveis diferentes ou cruzamentos desnivelados:** Cruzamento de duas ou mais vias, realizado por meio de uma “obra de arte” que permite a passagem das diversas correntes de tráfego a níveis diferentes, sem interferências.
- 2.3.40. **Nó de ligação:** Conjunto de vias, a níveis diferentes, na vizinhança de um cruzamento que assegura a ligação das vias que aí se cruzam.
- 2.3.41. **Cruzamento em “T”:** Cruzamento de nível de três vias em que uma delas está no prolongamento de outra e a terceira tem intercepção em ângulo aproximadamente recto.
- 2.3.42. **Cruzamento em “Y”:** Cruzamento de nível de três vias em que uma delas está praticamente no prolongamento de outra e a terceira tem intercepção em ângulo agudo ou obtuso.
- 2.3.43. **Cruzamento múltiplo:** Cruzamento de nível de cinco ou mais vias.
- 2.3.44. **Ramo:** Porção de qualquer das faixas de rodagem que convergem num cruzamento de nível, situado fora dele.
- 2.3.45. **Passagem para peões:** Espaço destinado na faixa de rodagem à travessia de peões.
- 2.3.46. **Passagem de nível:** Intercepção de uma via e de um caminho-de-ferro.
- 2.3.47. **Abrigo:** Alpendre ou pequena construção edificada junto de uma via e destinada, em geral, a abrigar as pessoas que aguardam transportes colectivos.

2.4. Terminologia relacionada com a sinalização

- 2.4.1. **Semáforo (sinal luminoso):** Sinal de luz cuja cor e duração determina a paragem de tráfego e indicam via livre, interdita ou com precaução. Pode ser manual ou automático.
- 2.4.2. **Intervalo:** Tempo durante a qual se mantêm as indicações dadas ao tráfego por sinal luminoso.

- 2.4.3. **Semáforo de comando manual:** Semáforo accionado manualmente.
- 2.4.4. **Semáforo comandado pelo tráfego:** Semáforo de comando automático accionado em certas condições pelos próprios veículos ou pelos peões.
- 2.4.5. **Semáforo de comando automático:** Semáforo accionado por meio de mecanismo automático.
- 2.4.6. **Semáforo de tempo fixo:** Semáforo de comando automático funcionando com intervalos fixos.
- 2.4.7. **Semáforo de comando independente:** Semáforo que funciona sem coordenação com outros semáforos.
- 2.4.8. **Semáforo de comando coordenado:** Conjunto de semáforos cujas indicações estão relacionados entre si de maneira a facilitar o trânsito num determinado percurso.
- 2.4.9. **Sinalização:** É o conjunto de sinais ou gestos que se destinam a regularizar o trânsito, cujo objectivo visa a obtenção da segurança e da fluidez do trânsito.
- 2.4.10. **Placas de sinalização:** Painel no qual figuram símbolos regulamentares ou outras indicações de sinalização vertical. Podem ser fixas ou amovíveis.
- 2.4.11. **Símbolo:** É um desenho convencionado inscrito numa placa de sinalização para dar uma informação adicional
- 2.4.12. **Linha longitudinal:** Marca longitudinal contínua ou descontínua que separa dois sentidos de tráfego.
- 2.4.13. **Linha transversal:** Linha contínua, em regra perpendicular ao eixo da via.
- 2.4.14. **Linha lateral:** Linha longitudinal que limita lateralmente a faixa de rodagem.
- 2.4.15. **Marca rodoviária:** Sinal rodoviário oposto na faixa de rodagem ou nas obras anexas tais como: lancis, passeios, bermas. As marcas nos pavimentos podem ser: marcas longitudinais, marcas transversais e outras. Outras marcas estão destinadas a regular a circulação e a advertir ou orientar os utentes das vias públicas.
- 2.4.16. **Inscrição:** Marca constituída por legenda ou símbolos.
- 2.4.17. **Cravo:** Marca constituída por um objecto rígido fixado no pavimento, ligeiramente saliente, e que por norma é reflectorizante.

2.5. Terminologia relacionada com os veículos

- 2.5.1. **Eixo:** Conjunto de rodas de um veículo, cujos centros se encontram num mesmo plano vertical, transversal a esse veículo.
- 2.5.2. **Rodado:** Conjunto de eixos a distância suficientemente pequena uns dos outros para poderem, para determinado fim, ser considerado com um único eixo.
- 2.5.3. **Brecagem** (raio de viragem): Perímetro da circunferência descrita por um automóvel ao dar uma curva.
- 2.5.4. **Sobreviragem:** Tendência de um veículo para deslizar de traseira quando aumenta a força lateral. Isto significa, que ao fazer uma curva, o veículo sobrevirador tenha tendência a fechar a trajectória. O modo de condução pode alterar esta tendência, e inclusivamente, o mesmo veículo pode variar de uma tendência sobreviradora para uma subviradora. A sobreviragem está dependente da magnitude da aceleração transversal a que é submetido.
- 2.5.5. **Subviragem:** Deslizamento preponderante do eixo dianteiro de um veículo em limite de aderência, apresentando tendência de aumentar o raio da trajectória.
- 2.5.6. **Força centrífuga:** Força que impele qualquer objecto para o lado de fora numa trajectória curva. Um automóvel, ao descrever uma curva, tem tendência para ser impelido para o lado exterior e inclinando, inclusivamente, a carroçaria.
- 2.5.7. **Aderência:** Capacidade de fixação duma superfície sobre outra. À máxima aderência ou impossibilidade total de escorregamento, por as superfícies em contacto serem excepcionalmente rugosas, atribui-se o coeficiente 1. Por isso, os coeficientes de aderência são sempre representados em valores decimais inferiores à unidade
- 2.5.8. **Capotagem:** Uma ou várias voltas de um veículo sobre si mesmo (ficando ou não, posteriormente, na sua posição normal).
- 2.5.9. **Derrapagem:** Situação em que as rodas de um veículo deixam de aderir ao pavimento, pelo que em vez de rolarem, começam a escorregar lateralmente, podendo o veículo fazer “peão”. Pode haver apenas derrapagem das rodas traseiras ou dianteiras ou de ambas simultaneamente (o que é menos frequente). A derrapagem mais perigosa é aquela que ocorre com as rodas traseiras de um veículo.
- 2.5.10. **Hidroplanagem:** Perda de aderência de um pneu resultante da acumulação de água à superfície do solo (pavimento) e que causa muitas vezes derrapagens.

- 2.5.11. **Glissagem:** Perda de aderência de um veículo num pavimento coberto de gelo, geada ou neve.
- 2.5.12. **Sinais de derrapagem e travagem:** Vestígios deixados pelas rodas de um veículo no pavimento ao derrapar ou quando trava violentamente. Os sinais são, por vezes, muito semelhantes, mas os de derrapagem são sinuosos, enquanto os de travagem são quase sempre em recta e constituídos por traços paralelos.
- 2.5.13. **Fading ou limite de eficiência dos travões:** Perda total ou quase total da eficiência dos travões, devido ao aquecimento provocado por travagens sucessivas. Depende não só da utilização sucessiva do travão mas também da qualidade do material componente do próprio travão.
- 2.5.14. **Shimmy ou Shimming:** Vibração nas rodas dianteiras que se transmite ao volante da direcção tornando a condução incómoda. É motivada pela má calibragem das rodas. Acontece em regra quando a veículo roda em pisos irregulares a velocidades de 80/90 Km/hora. Desaparece reduzindo a velocidade ou acelerando totalmente para velocidades altas.
- 2.5.15. **Paragem:** Imobilização de um veículo na faixa de rodagem ou fora dela, apenas pelo tempo estritamente necessário para a entrada ou saída de passageiros ou para breves operações de carga ou descarga, e desde que o seu condutor esteja pronto a retomar a marcha.
- 2.5.16. **Estacionamento:** Imobilização de um veículo na faixa de rodagem ou fora dela, por tempo superior ao necessário para a entrada e saída de passageiros e para carregar ou descarregar mercadoria, mesmo mantendo-se o seu condutor ao volante.
- 2.5.17. **Parqueamento:** Estacionamento em áreas para tal reservadas

2.6. Terminologia relacionada com o tráfego rodoviário

- 2.6.1. **Tráfego:** Conjunto de pessoas, de veículos, e de mercadorias que transitam numa via de comunicação considerados no conjunto ou separadamente, mas sempre em termos genéricos.
- 2.6.2. **Trânsito:** Movimento de pessoas, animais e veículos que utilizam uma via de comunicação.
- 2.6.3. **Corrente de tráfego:** Conjunto de veículos que transitem no mesmo sentido, em uma ou várias filas contínuas.

- 2.6.4. **Volume de tráfego:** Número de veículos que passam numa dada secção da via durante um período determinado.
- 2.6.5. **Densidade de tráfego:** Número de veículos que, num dado instante, ocupa a unidade de comprimento de uma via de tráfego. Exprime-se, geralmente em veículos por quilómetros.
- 2.6.6. **Capacidade de tráfego:** Número de veículos, que por unidade de tempo, pode passar numa dada secção da via, em certas condições.
- 2.6.7. **Tráfego de origem:** Parte do tráfego com origem numa dada área e que sai dela por um ou mais pontos.
- 2.6.8. **Tráfego de destino:** Parte do tráfego que entra numa dada área por um ou mais pontos e tem nela o destino.
- 2.6.9. **Tráfego local:** Parte do tráfego que circula numa dada área e tem nela a origem e o seu destino.
- 2.6.10. **Tráfego de entrada:** Tráfego que entra numa dada área por um ou mais pontos.
- 2.6.11. **Tráfego de saída:** Tráfego que sai de uma área por um ou mais pontos.
- 2.6.12. **Tráfego de passagem:** Tráfego que circula numa dada área ou passa por um dos pontos e tem a origem e o destino fora dela.
- 2.6.13. **Tráfego Médio Diário (TMD):** Volume médio de tráfego durante 24 horas. Obtém-se somando várias contagens diárias e dividindo o seu total pelo número de dias.

2.7. Terminologia relacionada com o trânsito

- 2.7.1. **Trânsito muito reduzido:** Passagem de um ou outro veículo com intervalos de tempo muito grandes entre eles. (Não deve ser utilizado o termo trânsito nulo pois este termo só deverá ser aplicado para vias interditas ao trânsito.)
- 2.7.2. **Trânsito reduzido:** Passagem de veículos com grandes intervalos de tempo entre eles, normalmente sem ligação à vista.
- 2.7.3. **Trânsito pouco intenso:** Passagem frequente de veículos isolados, embora por vezes com pequenos intervalos.
- 2.7.4. **Trânsito intenso:** Em coluna, com intervalos grandes entre as viaturas ou grupos de viaturas, de velocidades medidas de 60/70 Km/h.

- 2.7.5. **Trânsito muito intenso:** Em colunas cerradas sem paragens ou com paragens frequentes e com velocidade na ordem dos 40 Km/h.
- 2.7.6. **Trânsito congestionado:** Em coluna, com paragens muito frequentes e por vezes demoradas.

Apêndice 3

Estudo do Movimento dos Veículos

Este Apêndice destina-se a descrever, em termos científicos, o movimento dos veículos, através da área da Física designada por Mecânica que, por sua vez, se subdivide na cinemática e na dinâmica.

- A Cinemática estuda a descrição dos diferentes movimentos que um corpo pode realizar sem ter em conta as suas causas.

- A Dinâmica estuda o movimento dos corpos considerando as causas que o originam ou o modificam, ou seja, as forças.

3.1 Movimento na perspectiva da cinemática

Na perspectiva da cinemática, o movimento é um conceito relativo, dado que consiste na deslocação de um objecto de um local para outro tendo sempre por referência um determinado ponto. Por exemplo, um passageiro dentro de um veículo, em movimento, está também em movimento face a um observador exterior, mas está em repouso se tivermos por referência o próprio veículo.

Por outro lado, sempre que um corpo se move descreve uma **trajectória**. Esta consiste numa linha imaginária que descreve o movimento de um objecto por referência ao mesmo ponto.

O movimento é uma magnitude vectorial. Uma magnitude é vectorial quando para a sua determinação necessitamos, para além da sua medida, de uma direcção e de um sentido, ou seja, necessitamos de um vector. Assim, torna-se necessário fazer uma breve introdução ao cálculo vectorial.

3.1.1 Noções vectoriais

-Vector - Um vector é um segmento orientado. As magnitudes vectoriais indicam-se com uma seta sobre o símbolo utilizado em forma de módulo $|a|$.

A velocidade é uma magnitude vectorial, tem direcção, sentido e módulo. Quando dizemos que um veículo se move a uma velocidade de 60 Km/h, para que a velocidade fique perfeitamente descrita é necessário dizer também o sentido e a direcção. O valor numérico é o módulo de $|60|$ km/h.

Tendo em conta o ponto de aplicação, os vectores podem ser:

- Fixos – O seu ponto de aplicação é um ponto perfeitamente determinado;
- Deslizantes – O seu ponto de aplicação é um ponto qualquer da recta que determina a direcção do vector;
- Livres – O seu ponto de aplicação é um ponto qualquer do espaço.

Graficamente um vector representa-se por um segmento de recta com uma seta numa das suas extremidades. Um vector é composto pelos seguintes elementos: a origem - o ponto de aplicação (A); o extremo – o ponto de aplicação (B); a direcção – que coincide com a recta sobre a qual se encontra; o sentido – assinalado pela seta e o módulo – o valor do segmento (AB).

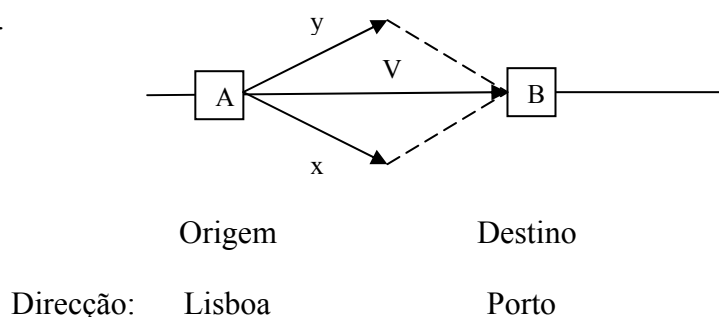


Figura 3.1 – Representação gráfica de um vector.

Assim, o vector (v) é o resultado da soma vectorial dos vectores (x) e (y).

Este vector representa um veículo que se desloca a partir de Lisboa, com uma velocidade vectorial de módulo 120 km/h, uma direcção Lisboa-Porto e o sentido do Porto.

Para descrevermos um movimento necessitamos dos conceitos de velocidade e de aceleração.

3.1.2 Velocidade

- A velocidade é igual ao espaço percorrido “ s ” por unidade de tempo “ t ”.
- A velocidade média “ v_m ” é o quociente entre a distância total percorrida “ Δs ”, desde o ponto final “ s_2 ” ao ponto inicial “ s_1 ”, e o tempo total dispendido “ Δt ”, desde o tempo final “ t_2 ” ao tempo inicial “ t_1 ” desse deslocamento.

$$v_m = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{s_2 - s_1}{t_2 - t_1} \quad (1)$$

- A velocidade instantânea é a velocidade que possui um corpo num instante determinado. Para determinar a velocidade instantânea necessitamos de conhecer a posição do corpo em

cada instante. A velocidade instantânea é o limite do cociente de $\Delta s/\Delta t$ quando Δt tende para zero ($\Delta t \rightarrow 0$).

No sistema internacional a velocidade mede-se em metro por segundo (m/s) ou em quilómetro por hora (km/h).

3.1.3 Aceleração

- A aceleração significa variar a velocidade quer aumentando-a quer diminuindo-a. Quanto maior for a variação maior será a aceleração. Logo a aceleração é a variação da velocidade por unidade de tempo.

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v_f - v_{il}}{\Delta t} \quad (2)$$

Sendo v_f a velocidade final, v_i a velocidade inicial e Δt o tempo decorrido.

Do mesmo modo que a velocidade, a aceleração também é uma magnitude vectorial. Portanto, é necessário para além do seu valor numérico, a direcção e o sentido em que se produz. Define-se como aceleração vectorial média (a_m) de um objecto como o quociente entre a variação da velocidade Δv e a variação do tempo Δt .

- A aceleração instantânea é o limite deste quociente quando Δt tende para zero ($\Delta t \rightarrow 0$).

- A aceleração devida à gravidade. É a aceleração (g) que experimenta um objecto que se move pela atracção gravitacional, cuja direcção é vertical e o sentido o solo. Sobre a superfície terrestre o seu valor é de igual a $9,81 \text{ m/s}^2$. A partir das seguintes expressões matemáticas podem calcular-se a velocidade (v), a altura (h):

$$v = g \cdot t \quad (3) \text{ e } v = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad (4)$$

$$h = \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2 \quad (5) \text{ e } h = \frac{1}{2} \cdot v \cdot t \quad (6)$$

A unidade de medida da aceleração no Sistema Internacional é m/s^2 . Quando o movimento tem uma aceleração de 10 m/s^2 , significa que em cada segundo a velocidade aumenta em 10 m/s .

Os valores adoptados para acelerações dependem simultaneamente das prestações mecânicas dos veículos, do atrito pneu-superfície do pavimento mobilizável e das exigências de conforto dos condutores.

Em veículos ligeiros de passageiros são correntes valores médios de aceleração da ordem dos $1,2 \text{ ms}^{-2}$ para uma variação da velocidade de 0 aos 80 km/h. Em situação de arranque (1ª velocidade) pode ser adoptada uma aceleração de 2 ms^{-2} . Para veículos pesados (com relação potência-peso de 10W/Kg) os valores das acelerações acima referidas são inferiores $0,4 \text{ ms}^{-2}$ e 1 ms^{-2} , respectivamente (Cardoso, 1999).

2.1.3.1 Cálculo da velocidade pela aceleração

Conhecida a aceleração tangencial média (a_{tm}), a velocidade inicial (v_i) e o tempo decorrido (t) desde que o móvel possuía tal velocidade, podemos calcular a velocidade final (v_f) pela seguinte expressão matemática:

$$v = v_i + a \cdot t \quad (7)$$

O vector velocidade tem dois componentes que são: a aceleração tangencial (responsável pela variação no valor da velocidade) e a aceleração normal (responsável pela variação da direcção).

Os movimentos curvilíneos tendem a possuir os dois tipos de aceleração.

3.1.4 Movimento rectilíneo uniforme (MRU)

Em termos científicos classifica-se o movimento como rectilíneo se a sua trajectória for uma linha recta e como uniforme se a velocidade for constante.

Se a velocidade de um corpo for constante ($v=k$), a distância percorrida num intervalo de tempo (t_2-t_1), conhecida a posição inicial (s_1), pode ser calculada pela seguinte expressão matemática:

$$s = s_1 + v \cdot (t_2 - t_1) \quad (8)$$

3.1.5 Movimento rectilíneo uniformemente acelerado (MRUA)

No caso do MRUA a velocidade não é constante. É um movimento cuja trajectória é recta e a aceleração constante. O cálculo da velocidade no MRUA pode efectuar-se pela seguinte expressão matemática:

$$v_f = v_i + a \cdot t \quad (9)$$

Se partir da posição de repouso $v_i=0$, logo:

$$v_f = a \cdot t \quad (10) \text{ e } a = v_f / t \quad (11)$$

O espaço percorrido pode calcular-se pela seguinte equação:

$$s = s_i + v_i \cdot t + \frac{1}{2} a \cdot t^2 \quad (12)$$

3.1.6 Movimento circular. Velocidade angular (ω)

O movimento angular (θ) expressa-se geralmente em radianos, em grados ou em rotações, assim: 1rotação= 2π rad= 360° .

Quando um corpo se move com velocidade (v) num círculo de raio (r), possui uma aceleração de magnitude v^2/r em direcção ao centro do círculo. Esta aceleração centrípeta está relacionada com a variação da direcção da velocidade. Por tratar-se de uma aceleração existirá uma força resultante na mesma direcção. Esta força designa-se por *força centrípeta*. Esta força é necessária para que exista um movimento circular.

Um corpo que descreve um movimento circular com velocidade constante em função do tempo (t), designado por *período*, necessário para fazer uma rotação completa, se o raio da circunferência for “ r ”, durante um *período* o corpo percorre uma distância igual a $2\pi r$, logo a sua velocidade está relacionada com o raio e o *período*:

$$v = \frac{2\pi r}{t} \quad (13)$$

O inverso do *período* denomina-se por *frequência* “ f ”, logo:

$$f = 1/t = \frac{v}{2\pi r} \quad (14)$$

A *frequência* expressa-se em rotações por segundo (rot./s).

Na figura ??? mostra-se uma linha circular de arco “ s ” e raio “ r ”. O ângulo “ θ ” varrido pelo raio vector é $\theta=s/r$. A variação do ângulo em função do tempo recebe o nome de *velocidade angular* ω :

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} = \frac{1}{r} \frac{ds}{dt} \quad (15)$$

Como a velocidade linear “ v ” é “ ds/dt ”, as velocidades linear e angular estão relacionadas por:

$$v = r \cdot \omega \quad (16)$$

A velocidade angular expressa-se em radianos por Segundo (rad/s).

3.1.7 Aceleração angular (α)

A aceleração angular (α) de um corpo é a variação da sua velocidade angular em relação ao tempo.

$$\alpha = \frac{\omega_f - \omega_i}{t} \quad (17)$$

As expressões matemáticas para o movimento angular uniformemente acelerado são análogas às do MRUA:

$$\omega_f = \omega_i + \alpha \cdot t; \theta = \omega_i \cdot t + \frac{1}{2} \alpha \cdot t^2 \quad (18)$$

Um corpo de massa “m” que se move com uma velocidade de módulo v, em volta de um círculo de raio “r”, experimenta uma *aceleração normal ou centrípeta*.

Ainda que o módulo da sua velocidade não varie, a direcção da sua velocidade varia continuamente. Esta variação na velocidade dá lugar a uma aceleração “ a_c ” da massa, dirigida desde o corpo ao centro do círculo. Esta aceleração centrípeta expressa-se pela seguinte equação:

$$a_c = \frac{v^2}{r} \quad (19)$$

Dado que : $v = \omega \cdot r$, também se tem que $a_c = \omega^2 \cdot r$. Deduzindo-se assim que a aceleração tangencial se pode expressar como:

$$a_c = r \cdot \alpha \quad (\text{Aceleração angular})(20)$$

3.2 O movimento na perspectiva da dinâmica

A dinâmica estuda o movimento dos corpos considerando as causas que o originam ou o modificam, ou seja, as forças.

A mecânica clássica ou Newtoniana é uma teoria do movimento baseada nas ideias de *massa*, *força* e as *leis* que relacionam estes conceitos físicos com as magnitudes cinemáticas – *posição*, *velocidade* e *aceleração*.

3.2.1 Leis de Newton (actualizadas)

- Primeira lei – **Lei da Inércia** – *Um corpo permanece no seu estado inicial de repouso ou movimento, com velocidade uniforme, a não ser que se exerça uma força de desequilíbrio externa.*

- Segunda lei – **Lei da Dinâmica** – *A aceleração de um corpo é inversamente proporcional à sua massa e directamente proporcional à força externa resultante que actua sobre ele.*

- Terceira lei - **Lei da Interação** – *As forças apresentam-se sempre em pares. Se um corpo “A” exerce uma força sobre um corpo “B”, o corpo “B” exercerá uma força igual mas oposta sobre o corpo “A”.*

Para a melhor compreensão das leis de Newton considera-se importante definir os conceitos de *força*, de *massa* e de *energia*.

- **Força** - Acção exercida sobre um corpo a fim de lhe produzir, ou não, movimento. A força no SI é expressa em Newtons (N). 1 N é igual à força necessária para produzir uma aceleração de 1m/s^2 num corpo padrão com 1 kg.

A fórmula matemática que melhor expressa a Força é a seguinte, em que (F) é a força, (m) a massa e (a) a aceleração:

$$\sum F = F = m \cdot a \quad (21)$$

- **A Força devida à gravidade** – A força mais comumente conhecida é aquela que representa a força de atracção da terra sobre os objectos. Esta força denomina-se por *peso*. Como a aceleração de um objecto é igual à força resultante dividida pela *massa* do objecto, podemos dizer que a *Força devida à acção da gravidade* (F_g) sobre o objecto é proporcional à *massa* do mesmo:

$$F_g(\text{peso}) = m \cdot g \quad (22)$$

A força exercida pela atracção da gravidade sobre um objecto designa-se por *peso*. Quando o peso é a única força que actua sobre o mesmo a sua aceleração é de $9,81\text{ m/s}^2$ ou 9,81 N. Assim se distingue o conceito de *peso* do conceito de *massa*. Sendo que o *peso* é igual à *massa* multiplicada pela gravidade.

- **Massa** – A *massa* é igual ao peso dos objectos em kg, medidos em balanças comuns.

3.2.2 O movimento e a energia mecânica

Os antigos gregos definiram energia como “força em acção”, pelo que poderíamos dizer que a energia é a capacidade para exercer uma força e produzir uma acção ou modificar algo. Energia é a capacidade para realizar um trabalho, ou seja, exercer uma força sobre um objecto e movimentá-lo de um lugar para outro. A energia manifesta-se de diferentes formas e recebe

distintos nomes segundo as acções ou alterações que provoca aos fenómenos que lhes estão associados.

O movimento implica também energia. Assim, no concernente à circulação dos veículos automóveis deve tomar-se em conta a energia mecânica. A energia mecânica é a que possuem alguns corpos pela velocidade de deslocação.

No que concerne ao movimento dos veículos há a considerar três conceitos: o trabalho (w), a Energia (E) e a Potência.

2.1.2.1 Trabalho

- Trabalho – *É a força aplicada a um objecto produzindo-lhe uma determinada deslocação no espaço.* Quando uma força (F) actua sobre um corpo, este experimenta um deslocamento (s). A componente de (F) na direcção de (s) é igual a $F \cdot \cos\theta$. O trabalho (w) efectuado pela força (F) define-se como a componente de F na direcção do deslocamento multiplicada pelo deslocamento.

Note-se que α é o ângulo entre a força e o vector de deslocamento. O trabalho é uma magnitude escalar. Se F e s estiverem na mesma direcção e no mesmo sentido, $\cos 0^\circ = 1$ e $w = F \cdot s$. Porém, se F e s tiverem sentidos opostos, então $\cos 180^\circ = -1$ e $w = -F \cdot s$, o trabalho é negativo. No caso das forças de atrito diminuem o movimento de um objecto, logo o seu sentido é contrário ao deslocamento, nesta situação ocorre um trabalho negativo.

Unidades do trabalho. Uma unidade de força por uma unidade de distância, ou seja, um Newton por metro, que é igual a um Jule (J). Este é o trabalho efectuado por uma força de 1N quando desloca um objecto em 1 metro na direcção e sentido da força.

2.1.2.2 Energia cinética

- **Energia cinética:** Um corpo em movimento possui energia cinética, ao mover-se é capaz de modificar-se ou modificar outro objecto. Quanto maior é a velocidade maior é a energia cinética. A Energia Cinética (E_c) de um objecto é a sua capacidade de realizar um trabalho devido ao seu movimento. Se um objecto de massa (m) tem uma velocidade (v), a sua E_c é a seguinte:

$$E_c = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \quad (23)$$

Se (m) se representa em kg e (v) em m/s, as unidades de E_c são Jules.

O trabalho realizado pela força que produz ou modifica o movimento de um objecto é igual à variação da energia cinética deste (Teorema das Forças Vivas). A fórmula matemática que expressa o teorema é a seguinte:

$$E_c = \frac{1}{2} m \cdot v_f^2 - \frac{1}{2} m \cdot v_i^2 \quad (24)$$

Se o objecto partir do repouso ($v_i=0$), então:

$$E_c = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \quad (25)$$

2.1.2.3 Energia potencial

- **Energia potencial (Ep):** É a energia que possuem os objectos devido à altura a que se encontram do solo. A Energia Potencial (Ep) de um objecto é igual à sua capacidade para realizar um trabalho devido à sua posição no campo gravitacional. Quando abandonamos um objecto a uma certa altura do solo, este adquire uma velocidade e, por conseguinte, uma energia cinética, que resulta do trabalho realizado pelo “peso” do objecto quando cai, esta energia designa-se por *Energia Potencial Gravitacional*.

- A Energia potencial gravitacional na superfície terrestre é igual à capacidade que tem o *peso* (mxg) dos objectos para realizar trabalho ao cair. O trabalho realizado pelo peso (P) ao cair de uma altura (s) é igual a:

$$E_p = P \cdot s \cdot \cos \theta \text{ ou } W = F \cdot s \cdot \cos \theta \quad (26)$$

A energia potencial gravitacional que um objecto pode realizar ao cair é igual ao *peso* pela altura, qualquer que seja a trajectória percorrida, ou seja, um corpo de massa (m), situado a uma altura (h).

Porém, sendo: $h = s \cdot \cos \theta$ e $P = m \cdot g$, então:

$$E_p = m \cdot g \cdot h \quad (27)$$

2.1.2.4 Energia de atrito

- **Energia de atrito** – É a energia necessária para fazer parar ou reduzir a velocidade de um corpo em movimento. No caso concreto do movimento de um veículo automóvel, quando este trava e reduz a velocidade ou para verifica-se uma dissipação da energia cinética que se

converte em energia de atrito. O atrito resulta da fricção entre os pneumáticos do veículo e o pavimento onde circula.

Se a energia de atrito (E_{At}) é igual ao trabalho (W) que um objecto produz quando trava ($E_{at}=W$) e se o trabalho é igual ao produto da massa (m) pela distância (d) de travagem ($W=m \cdot a \cdot d$), então a energia de atrito é igual:

$$E_{at} = m \cdot a \cdot d \quad (28)$$

Se a aceleração (a) é igual ao produto do coeficiente de atrito (μ) pela força da gravidade (g)

$$a = \mu \cdot g \quad (29)$$

Então a energia de atrito pode expressar-se pela seguinte equação matemática:

$$E_{at} = m \cdot g \cdot \mu \cdot d \quad (30)$$

Sendo:

P=peso do veículo;

μ =coeficiente de atrito do pavimento;

d=distância percorrida em travagem;

g=aceleração devida à força da gravidade;

m=massa do veículo.

Quando um veículo automóvel realiza uma travagem violenta e bloqueando as rodas até parar, toda a sua energia cinética se converte em energia de atrito, conforme o Princípio da Conservação da Energia (PCE), ou seja, na natureza “*a energia nem se cria nem se destrói, simplesmente se transforma*”. Assim, através do PCE torna-se possível estimar a velocidade a que circulava um veículo pela medição do comprimento dos rastros de travagem, deduzindo a expressão matemática que estabelece a igualdade das duas energias, ou seja:

Se:

$$E_c = E_{at} \quad (31)$$

Então:

$$\frac{1}{2} m \cdot v^2 = m \cdot g \cdot \mu \cdot d \quad (32)$$

Logo:

$$v = \sqrt{2 \cdot \mu \cdot g \cdot d} \quad (33)$$

3.3 Conversão da tabela de atritos em taxas de desaceleração

Na sequência da descrição do movimento na perspectiva da dinâmica, considerando que a aceleração (a) é o produto da gravidade (g) pelo atrito (μ) do pavimento, poder-se-ão estabelecer os seguintes valores máximos e mínimos de desaceleração de um veículo, face à Tabela de referência dos Coeficientes de Atrito por Tipo de Pavimento.

Tabela 2.3 – Taxas de desaceleração calculadas a partir da tabela de coeficientes de atrito.

Taxas de Desaceleração Face aos Coeficientes de Atrito por Tipo de Pavimento (ms ⁻²)		
Descrição da superfície	Seca	Molhada
Betão ou Asfalto		
Novo e liso	7,0 – 10,0	5,0 – 7,5
Usado	6,0 – 7,5	4,5 – 6,5
Polido	5,0 – 6,5	4,5 – 6,0
Asfalto		
Novo e liso	6,5 – 10,0	4,5 – 7,5
Usado	5,5 – 7,0	4,0 – 6,5
Polido	4,5 – 6,5	4,0 – 6,0
Pedra compactada		
Nova e lisa	7,0 – 9,0	6,0 – 8,5
Polida	5,0 – 6,5	2,5 – 5,0
Pedra		
Calçada	5,5 – 7,5	5,5 – 7,5
Grelha metálica		
Com ranhuras	3,5 – 7,5	2,0 – 3,5
Neve		
Compactada	3,5 – 5,5	3,0 – 6,0
Solta	1,0 – 2,0	3,0 – 6,0
Gelo		
Liso	0,7 – 2,0	0,5 – 1,0

A necessidade constatada de elaboração desta tabela foi identificada na modelação do sistema rodoviário, na parte referente ao movimento dos veículos.

Apêndice 4

Estudo da Distribuição das Velocidades Praticadas nas Estradas Portuguesas

Este apêndice destina-se a referir os dados de um estudo realizado pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil, sobre as velocidades praticadas pelos condutores nas estradas portuguesas. A importância de apresentar os resultados deste estudo prende-se com a necessidade de modelar a velocidades de deslocação dos veículos face à distribuição desta pelas diferentes classes de via. Os dados apresentados não estão comentados por que estes se destinarem apenas à modelação da velocidade em eventuais simulações computacionais por tipo de via. A tipificação das diferentes classes de estradas (vias) aqui referidas encontra-se conceptualizada no capítulo 6, sobre a modelação do sistema rodoviário.

4.1. Auto-estradas

Quadro 4.1 – Distribuição de velocidades em auto-estrada

Velocidades	Total dos dias		Fim-de-semana		Dia útil	
(Km/h)	Ligeiros	Pesados	Ligeiros	Pesados	Ligeiros	Pesados
Velocidade limite	120	90*	120	90*	120	90*
Velocidade média	121	111	121	107	121	112
Percentagem acima limite	54%	78%	53%	77%	54%	79%
+ 10 km/h	37%	64%	37%	61%	37%	66%
+ 30 km/h **	12%	48%	12%	40%	11%	51%
+ 60 km/h ***	1%	23%	1%	16%	1%	26%
Número de observações	196977	24948	90256	6177	106721	18771

* 90 km/h para veículos pesados de mercadorias; 100 km/h para veículos pesados de passageiros;

** 20 km/h para veículos pesados; *** 40 km/h para veículos pesados.

4.2. Vias reservadas

Quadro 4.2 – Distribuição de velocidades em vias reservadas (veículos automóveis)

Velocidades	Total dos dias		Fim-de-semana		Dia útil	
(Km/h)	Ligeiros	Pesados	Ligeiros	Pesados	Ligeiros	Pesados
Velocidade limite	90	80	90	80	90	80
Velocidade média	106	95	107	98	105	94
Percentagem acima limite	82%	89%	84%	92%	80%	87%
+ 10 km/h	62%	60%	65%	68%	60%	56%
+ 30 km/h *	21%	31%	22%	38%	20%	28%
+ 60 km/h **	3%	7%	3%	10%	2%	6%
Número de observações	157520	27222	70240	8527	87280	18695

* 20 km/h para veículos pesados; ** 40 km/h para veículos pesados.

4.3. Estradas nacionais

Quadro 4.3.1 – Distribuição de velocidades em Estradas Nacionais

Velocidades	Total dos dias		Fim-de-semana		Dia útil	
(Km/h)	Ligeiros	Pesados	Ligeiros	Pesados	Ligeiros	Pesados
Velocidade limite	90	80	90	80	90	80
Velocidade média	102	94	103	97	101	92
Percentagem acima limite	74%	85%	76%	87%	72%	84%
+ 10 km/h	54%	54%	57%	62%	51%	50%
+ 30 km/h *	19%	27%	21%	36%	18%	24%
+ 60 km/h **	2%	8%	2%	12%	2%	6%
Número de observações	109128	19594	57011	5103	52117	14491

* +20 km/h para veículos pesados; ** + 40 km/h para veículos pesados.

Quadro 4.3.2 – Distribuição de velocidades em E.N. (Travessia de localidades)

Velocidades	Total dos dias		Fim-de-semana		Dia útil	
(Km/h)	Ligeiros	Pesados	Ligeiros	Pesados	Ligeiros	Pesados
Velocidade limite	80	80	80	80	80	80
Velocidade média	79	80	79	82	79	79
Percentagem acima limite	45%	46%	44%	53%	45%	42%
+ 10 km/h	20%	20%	21%	24%	20%	17%
+ 30 km/h *	2%	8%	3%	10%	2%	7%
+ 60 km/h **	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Número de observações	129410	6352	59184	2347	70226	4005

* +20 km/h para veículos pesados; ** + 40 km/h para veículos pesados.

Quadro 4.3.3 – Distribuição de velocidades em E.N.- (Meio Semi-Urbano)

Velocidades	Total dos dias		Fim-de-semana		Dia útil	
(Km/h)	Ligeiros	Pesados	Ligeiros	Pesados	Ligeiros	Pesados
Velocidade limite	50	50	50	50	50	50
Velocidade média	62	60	62	60	62	59
Percentagem acima limite	83%	80%	83%	81%	83%	80%
+ 10 km/h	58%	51%	57%	53%	59%	50%
+ 30 km/h *	9%	15%	9%	17%	9%	14%
+ 60 km/h **	0%	1%	0%	2%	0%	1%
Número de observações	159208	18739	81657	4757	77551	13982

* +20 km/h para veículos pesados; **+ 40 km/h para veículos pesados.

4.4. Vias urbanas

Quadro 4.4.1 – Distribuição de velocidades em vias urbanas de nível I

Velocidades	Total dos dias		Fim-de-semana		Dia útil	
(Km/h)	Ligeiros	Pesados	Ligeiros	Pesados	Ligeiros	Pesados
Velocidade limite	80	80	80	80	80	80
Velocidade média	83	79	85	82	81	78
Percentagem acima limite	60%	54%	63%	59%	58%	52%
+ 10 km/h	39%	32%	41%	37%	37%	30%
+ 30 km/h *	11%	17%	12%	21%	10%	15%
+ 60 km/h **	0%	2%	0%	4%	0%	2%
Número de observações	888517	70090	369855	18756	518662	51334

* 20 km/h para veículos pesados; **+40 km/h para veículos pesados.

Quadro 4.4.2 – Distribuição de velocidades em vias urbanas de nível II

Velocidades	Total dos dias		Fim-de-semana		Dia útil	
(Km/h)	Ligeiros	Pesados	Ligeiros	Pesados	Ligeiros	Pesados
Velocidade limite	50	50	50	50	50	50
Velocidade média	53	50	54	51	53	49
Percentagem acima limite	59%	49%	58%	52%	59%	46%
+ 10 km/h	35%	26%	34%	27%	35%	25%
+ 30 km/h *	4%	10%	5%	10%	4%	9%
+ 60 km/h **	0%	1%	0%	1%	0%	1%
Número de observações	407718	21701	191231	8468	216487	13233

* 20 km/h para veículos pesados; ** 40 km/h para veículos pesados.

Quadro 4.4.3 – Distribuição de velocidades em vias urbanas de nível III

Velocidades	Total dos dias		Fim-de-semana		Dia útil	
(Km/h)	Ligeiros	Pesados	Ligeiros	Pesados	Ligeiros	Pesados
Velocidade limite	50	50	50	50	50	50
Velocidade média	45	43	47	47	44	40
Percentagem acima limite	38%	32%	41%	39%	36%	28%
+ 10 km/h	21%	20%	23%	24%	19%	18%
+ 30 km/h *	4%	10%	4%	13%	3%	9%
+ 60 km/h **	0%	2%	0%	3%	0%	2%
Número de observações	201851	15539	94985	5318	106866	10221

* 20 km/h para veículos pesados; ** 40 km/h para veículos pesados.