

# **CALIBRAÇÃO DE MODELOS MICROSCÓPICOS DE SIMULAÇÃO DE TRÁFEGO EM REDES URBANAS**

**CRISTINA ALEXANDRA TEIXEIRA VILARINHO**

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de  
**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM VIAS DE COMUNICAÇÃO**

---

Orientador: Professor Doutor José Pedro Maia Pimental Tavares

JULHO DE 2008

## **MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2007/2008**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ [miec@fe.up.pt](mailto:miec@fe.up.pt)

*Editado por*

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ [feup@fe.up.pt](mailto:feup@fe.up.pt)

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2007/2008 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2008.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respectivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão electrónica fornecida pelo respectivo Autor.

## **AGRADECIMENTOS**

Especialmente ao Professor José Pedro Maia Pimental Tavares agradeço todos os conhecimentos transmitidos ao longo do tempo e a leitura atenta e cuidada que fez desta dissertação. Agradeço ainda toda a disponibilidade, estímulo e amizade que me ofereceu ao longo deste trabalho.

Ao Professor Jaume Barceló da Universidade Politécnica da Catalunha, Barcelona, um especial agradecimento por me ter recebido tão amavelmente no seu departamento durante o período de Erasmus e apoio mesmo após o meu regresso.

À Direcção Municipal da Via Pública Câmara Municipal do Porto, em especial ao Engenheiro João Miguel Valente Neves, queria agradecer o apoio e amizade com que me receberam e por toda a informação e recursos disponibilizados tão necessários à realização desta dissertação.

Aos amigos: Ana Teixeira, Ana Freitas, André Vieira, Andreia Vidal, Bernardo Braga, Carlos Pereira, João Viana, José Figueiredo, José Pinheiro, Laura Vilarinho, Luís Nunes, Manuel Silva, Mariana Rocha, Paulo Ramos, Pedro Rodrigues, Rita Rodrigues e Vânia Mendes a minha sincera gratidão pela disponibilidade oferecida no trabalho de campo.

À secção de Planeamento da Faculdade de Engenharia do Porto, em especial ao Engenheiro Pedro Abrantes pelos dados de tráfego facultados relativos aos parques de estacionamento da zona da Asprela.

Uma palavra especial ao José Nuno Figueiredo pela constante partilha, eterna amizade e estímulo permanente. Tu mais do que ninguém acompanhaste cada minuto deste trabalho.

Aos meus pais e à Sílvia, é espectacular ter-vos sempre presentes em todas as minhas conquistas!



## RESUMO

Actualmente a aplicação de modelos de simulação de tráfego no estudo de redes urbanas constitui uma importante ferramenta de apoio para o teste e análise de problemas de transporte principalmente por duas razões. A primeira deve-se à dificuldade de realização de experiências no sistema real e a segunda à possibilidade que os modelos oferecem em testar distintas alternativas de um modo mais seguro e económico.

No entanto, os resultados obtidos em modelos de simulação deverão ter um significado claro bem como serem adequados à realidade, pelo que as fases de calibração e, posterior, validação do modelo são fundamentais no grau de confiança dos resultados do modelo.

O objectivo principal do trabalho de investigação proposto consiste em contribuir na aplicação de modelos microscópicos de tráfego em redes urbanas, com recurso ao modelo AIMSUN, designadamente na selecção e quantificação dos parâmetros e respectivos critérios de calibração dos modelos. A avaliação da importância de cada variável na modelação de tráfego é realizada através de testes e verificações que avaliam a capacidade de simular a realidade do modelo. Deste modo, a complexidade do processo de calibração é reduzida uma vez que é conhecido o impacto da alteração das variáveis na exactidão dos resultados.

As análises foram levadas a cabo de modo a detectar a sensibilidade às variáveis estudadas cujos valores foram alterados de um modo isolado ou simultâneo. AIMSUN foi o modelo microscópico utilizado e foi aplicado a uma zona da cidade do Porto (Asprela). Antes de iniciar o processo de calibração foi necessário desenvolver uma rede urbana (recolher os dados, codificação, verificação). As variáveis e parâmetros utilizados nesta dissertação são os normalmente referidos na bibliografia da especialidade.

Esta metodologia permitiu identificar algumas das variáveis que possuem maior impacto nos resultados finais e também a precisão necessária. Com base nos resultados foi efectuada uma análise crítica para cada parâmetro utilizado na análise efectuada.

**PALAVRAS-CHAVE:** modelo de simulação de tráfego microscópico, calibração, AIMSUN, análise de sensibilidade.



## **ABSTRACT**

Nowadays, simulation modelling in urban traffic networks is an increasingly popular tool for testing and analysing transportation problems for two main reasons. First, it overcomes the difficulties of making experiences in real world environment. Second, these models offer the possibility of testing several alternatives in a safer and less expensive way.

The results obtained in simulation models should be clear and appropriate to the reality. Hence, for any simulation study, model calibration followed by validation is a crucial step to obtain the desired level of confidence.

This research aims to contribute to the application of microscopic traffic models in urban networks using the microscopic simulation model AIMSUN in the selection and quantification of parameters for the calibration process. Furthermore, efforts are made to assess the importance of each variable in the traffic model process using tests and verifications in order to evaluate the reliability of the model. This way the complexity of calibration can be significantly reduced since the impact of errors in the final results accuracy is known.

Analysis were performed to detect the sensibility to several isolated or multiple variables, establishing the comparison between the simulated results and a reference model for each case. This model can be the observed reality or one that is obtained by simulation. The microscopic simulation model AIMSUN was applied to a zone in the city of Porto (Asprela). Prior to the calibration process it was necessary to develop the urban network (data collection, codification, verification). The variables and parameters used in this dissertation are the frequently mentioned in research bibliography.

This methodology allowed the identification of some variables which have a greater impact in the final results as well as their suitable precision. Based on these final results, a sensitivity analysis was further performed for each parameter used.

**KEYWORDS:** microscopic traffic simulation, calibration, AIMSUN, sensitivity analysis.



## ÍNDICE GERAL

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	i
<b>RESUMO</b> .....	iii
<b>ABSTRACT</b> .....	v
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>1.1. ENQUADRAMENTO GERAL</b> .....	1
<b>1.2. APRESENTAÇÃO DA DISSERTAÇÃO</b> .....	2
1.2.1. OBJECTIVOS .....	2
1.2.2. ESTRUTURA DO TRABALHO.....	3
<b>2. MODELOS DE SIMULAÇÃO DE TRÁFEGO</b> .....	5
<b>2.1. APRESENTAÇÃO</b> .....	5
<b>2.2. DESCRIÇÃO</b> .....	5
2.2.1. NÍVEL DE DETALHE .....	6
2.2.2. ESCALA TEMPORAL.....	6
2.2.3. REPRESENTAÇÃO DO PROCESSO .....	6
<b>2.3. MODELOS MICROSCÓPICOS VERSUS MODELOS MACROSCÓPICOS E MICROSCÓPICOS</b> .....	7
<b>2.4. CARACTERIZAÇÃO DOS MODELOS MICROSCÓPICOS</b> .....	10
2.4.1. CLASSIFICAÇÃO DOS MODELOS MICROSCÓPICOS.....	10
2.4.1.1. Meio Urbano.....	11
2.4.1.2. Meio Inter-Urbano .....	12
2.4.1.3. Modelos Mistos .....	14
2.4.2. DESCRIÇÃO DOS DIVERSOS MODELOS MICROSCÓPICOS .....	15
2.4.2.1. Avaliação dos Modelos .....	16
<b>2.5. IMPORTÂNCIA DOS MODELOS MICROSCÓPICOS</b> .....	17
<b>2.6. ÁREAS A DESENVOLVER NOS MODELOS MICROSCÓPICOS DE SIMULAÇÃO</b> .....	17
<b>2.7. CONCLUSÕES</b> .....	18
<b>3. CALIBRAÇÃO</b> .....	21
<b>3.1. PREÂMBULO</b> .....	21
<b>3.2. VALIDAÇÃO</b> .....	22

<b>3.3. CALIBRAÇÃO</b> .....	24
3.3.1. VARIÁVEIS .....	24
3.3.1.1. Variáveis Globais.....	24
3.3.1.2. Variáveis de Secção.....	24
3.3.1.3. Variáveis Particulares do Veículo Tipo.....	24
3.3.2. PROCEDIMENTOS DE CALIBRAÇÃO .....	25
3.3.2.1. Parâmetro: Volume.....	25
3.3.2.2. Parâmetro: Velocidade .....	25
<b>3.4. MÉTODOS</b> .....	26
3.4.1. ÍNDICES E REPRESENTAÇÕES GRÁFICAS .....	26
3.4.2. TESTES ESTATÍSTICOS .....	32
3.4.3. AMOSTRAGEM.....	36
<b>3.5. ANÁLISE CRÍTICA DOS PARÂMETROS/CRITÉRIOS</b> .....	37
<b>3.6. NÚMERO DE SIMULAÇÕES</b> .....	37
<b>4. CASO DE ESTUDO</b> .....	39
<b>4.1. AIMSUN – MODELO MICROSCÓPICO DE SIMULAÇÃO</b> .....	39
4.1.1. DESCRIÇÃO .....	39
4.1.2. MODELAÇÃO DE TRÁFEGO.....	40
4.1.3. MODELOS COMPORTAMENTAIS DO VEÍCULO .....	42
4.1.3.1. Interacção entre veículos .....	42
4.1.3.2. Mudança de Via.....	43
4.1.3.3. Intervalo Crítico.....	44
4.1.4. GESTÃO DE TRÁFEGO .....	44
4.1.5. MODELAÇÃO DE TRANSPORTE PÚBLICO .....	45
4.1.6. SIMULAÇÃO.....	45
4.1.7. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO.....	46
<b>4.2. INTRODUÇÃO AO CASO DE ESTUDO</b> .....	48
<b>4.3. IDENTIFICAÇÃO DA ZONA ALVO DE ESTUDO</b> .....	48
<b>4.4. DEFINIÇÃO DO SOFTWARE QUE MELHOR SE ADEQUA À ZONA E OBJECTIVOS DE ANÁLISE</b> ..	49
<b>4.5. RECOLHA DE DADOS PARA O MODELO DE MICRO-SIMULAÇÃO</b> .....	49
4.5.1. DADOS GEOMÉTRICOS .....	49
4.5.2. ELEMENTOS DE CONTROLO .....	50

4.5.3. TIPO E CLASSES DE VEÍCULOS .....	51
4.5.4. TIPO DE ESTRADAS E VIAS .....	52
4.5.5. LINHAS DE TRANSPORTE PÚBLICO .....	53
4.5.6 PROCURA.....	53
<b>4.6. CODIFICAÇÃO DO MODELO .....</b>	<b>54</b>
<b>4.7. VERIFICAÇÃO DO MODELO.....</b>	<b>54</b>
<b>5. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE.....</b>	<b>57</b>
<b>5.1. APRESENTAÇÃO .....</b>	<b>57</b>
<b>5.2. METODOLOGIA .....</b>	<b>58</b>
<b>5.3. TIPOS DE ANÁLISE DE SENSIBILIDADE.....</b>	<b>58</b>
<b>5.4. VARIÁVEIS ESTUDADAS .....</b>	<b>59</b>
5.4.1. TEMPO DE REACÇÃO (RT).....	60
5.4.2. TEMPO DE REACÇÃO PARADO (RTS).....	61
5.4.3. ACELERAÇÃO MÁXIMA (MA) .....	61
5.4.4. DESACELERAÇÃO NORMAL (ND) .....	61
5.4.5. DESACELERAÇÃO MÁXIMA (MD).....	62
5.4.6. VELOCIDADE.....	62
<b>5.5. SELECÇÃO DOS PARÂMETROS DE AVALIAÇÃO.....</b>	<b>62</b>
<b>5.6. PROCEDIMENTOS.....</b>	<b>63</b>
<b>5.7. TESTES DE ANÁLISE DE SENSIBILIDADE.....</b>	<b>64</b>
5.7.1. ENQUADRAMENTO .....	64
5.7.2. ANÁLISE 1 .....	64
5.7.3. ANÁLISE 2 .....	65
5.7.4. ANÁLISE 3 .....	72
5.7.4.1. Análise Refinada .....	72
5.7.4.2. Análise Discreta .....	78
5.7.4.3. Comparação com o caso base .....	80
<b>5.8. CONCLUSÕES DA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE .....</b>	<b>86</b>
<b>6. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS.....</b>	<b>89</b>
<b>6.1. PRINCIPAIS CONCLUSÕES.....</b>	<b>89</b>
<b>6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....</b>	<b>90</b>

<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	91
<b>ANEXOS 1 – CONTAGENS DIRECCIONAIS DE TRÁFEGO</b> .....	
<b>ANEXO 2 – TEMPOS DE VIAGEM</b> .....	
<b>ANEXO 3 – REDE DA ASPRELA CODIFICADA EM AIMSUN</b> .....	
<b>ANEXO 4 – COEFICIENTE DE <i>THEIL</i></b> .....	

## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig.2.1. – Nível de detalhe dos modelos, fonte [3].....	7
Fig.3.1. – Fases de um modelo.....	21
Fig.3.2. – Diagrama de lógica para a validação do, retirado de [6]. .....	23
Fig.3.3. – Exemplo de uma análise por gráfico de dispersão [6] de valores observados e simulados. 28	
Fig.3.4. – Exemplo de um gráfico de dispersão [13] de valores observados versus simulados, com uma recta de regressão $y=x$ .....	29
Fig.3.5. – Possibilidades de comparação de séries, retirado de [6] .....	30
Fig.3.6. – Alguns critérios definidos na referência bibliográfica [9].....	31
Fig.3.7. – Exemplo de Teste Theil's U-Statistic calculado pelo AIMSUN, retirado de [6].....	36
Fig.3.8. – Exemplo de aplicação da fórmula, retirado de [9] .....	38
Fig.4.1. – Variáveis de um tipo de veículos .....	41
Fig.4.2. – Representação gráfica dos tipos de veículos .....	42
Fig.4.3. – Exemplo de informação de resultados (número de veículos).....	46
Fig.4.4. – Exemplo dos resultados relativos à informação de um veículo .....	46
Fig.4.5. – Nó de Paranhos, construção da rede com auxílio a um ficheiro CAD e a um ortofotomapa 50	
Fig.4.6. – Exemplo de ficha de Programação da intersecção Circunvalação com Rua Dr. Bernardino de Almeida.....	51
Fig.4.7. – Exemplo de erros detectados pelo assistente do software na rede. ....	55
Fig.5.1. – Alteração da velocidade mínima e média .....	62
Fig.5.2. – Percursos realizados.....	63
Fig.5.3. – Representação do processo de análise de sensibilidade.....	63
Fig.5.4. – Variáveis alteradas na análise de sensibilidade .....	65
Fig.5.5. – Gráfico tipo de interpretação dos resultados, adoptado de [12].....	67
Fig.5.6. – Representação gráfica da análise 2.....	68
Fig.5.7. – Gráfico da análise 2 ordenado pelo tempo de reacção parado.....	69
Fig.5.8. – Gráfico da análise 2 ordenado pela aceleração máxima.....	69
Fig.5.9. – Gráfico da análise 2 ordenado pela desaceleração normal.....	70
Fig.5.10. – Gráfico da análise 2 ordenado pela desaceleração máxima.....	71
Fig.5.11. – Variáveis estudadas .....	72
Fig.5.12. – Tempo de reacção Caso 1 .....	73
Fig.5.13. – Tempo de reacção Caso 2.....	73
Fig.5.14. – Aceleração máxima Caso 1 .....	74

Fig.5.15. – Aceleração máxima Caso 2.....	74
Fig.5.16. – Desaceleração normal Caso 1 .....	75
Fig.5.17. – Desaceleração normal Caso 2 .....	75
Fig.5.18. – Desaceleração máxima Caso 1.....	76
Fig.5.19. – Desaceleração máxima Caso 2.....	76
Fig.5.20. – Velocidade Caso 1 .....	77
Fig.5.21. – Velocidade Caso 2 .....	77
Fig.5.22. – Variáveis alteradas na análise discreta.....	78
Fig.5.23. – Aceleração Máxima Caso 1, análise discreta .....	79
Fig.5.24. – Desaceleração normal Caso 1, análise discreta.....	79
Fig.5.25. – Desaceleração máxima Caso 1, análise discreta .....	80
Fig.5.26. – Comparação do tempo de reacção com o caso base 1.....	81
Fig.5.27. – Comparação do tempo de reacção com o caso base 2.....	82
Fig.5.28. – Comparação da aceleração máxima com o caso base 1 .....	82
Fig.5.29. – Comparação da aceleração máxima com o caso base 2 .....	83
Fig.5.30. – Comparação da desaceleração normal com o caso base 1 .....	83
Fig.5.31. – Comparação da desaceleração normal com o caso base 2.....	84
Fig.5.32. – Comparação da desaceleração máxima com o caso base 1 .....	84
Fig.5.33. – Comparação da desaceleração máxima com o caso base 2 .....	85
Fig.5.34. – Comparação da velocidade com o caso base 1 .....	85
Fig.5.35. – Comparação da velocidade com o caso base 2 .....	86

**ÍNDICE DE QUADROS**

Quadro 2.1. – Comparação do modelo micro versus macroscópicos, fonte [4] .....	9
Quadro 2.2. – Os quatro tipos de modelos de micro-simulação, fonte [4].....	11
Quadro 2.3. – Funcionalidade dos modelos urbanos de micro-simulação, fonte [5].....	12
Quadro 2.4. – Funcionalidade dos modelos de meio inter-urbano de micro-simulação, fonte [5] .....	13
Quadro 2.5. – Funcionalidades dos modelos mistos de micro-simulação, fonte [5].....	14
Quadro 2.6. – Vantagens de alguns modelos, fonte [5].....	16
Quadro 2.7. – Desvantagens de alguns modelos, fonte [5].....	17
Quadro 3.1. – Critério para as estatísticas RMSP e $r$ segundo [10] .....	28
Quadro 3.2. – Critério para as estatísticas GEH, segundo [9]. .....	31
Quadro 3.3. – Valores comparativos do Erro Métrico entre diferentes modelos, segundo [15]. .....	32
Quadro 3.4. – Significados dos valores das três componentes de U segundo [9] .....	35
Quadro 4.1. – Resumo da base de dados de saída do AIMSUN com base em [8] .....	47
Quadro 4.2. – Valores médios das características dos veículos ([19], [20], [21], [22]).....	52
Quadro 4.3. – Resultados globais das contagens <i>in situ</i> .....	54
Quadro 5.1. – Distribuição do número de veículos por categorias .....	60
Quadro 5.2. – Tempos de percursos, em segundos, de acordo com a alteração de variáveis .....	64
Quadro 5.3. – Valores adoptados para as variáveis .....	66
Quadro 5.4. – Casos escolhidos .....	72
Quadro 5.5. – Parâmetros dos casos escolhidos .....	72



## INTRODUÇÃO

### 1.1. ENQUADRAMENTO GERAL

O crescente aumento do tráfego automóvel em meio urbano tem vindo a agravar as situações de congestionamento constituindo assim um grave problema das grandes cidades, com impactos tanto a nível social como económico, que se tem vindo a acentuar nas últimas décadas. De modo a minimizar este fenómeno torna-se indispensável não só um cuidadoso planeamento de transportes como também uma eficaz gestão da infra-estrutura de transporte.

O planeamento de transportes tem como objectivo responder adequadamente às necessidades de deslocação da população, a partir da criação de serviços de transporte com qualidade, a um custo adequado e com impacte mínimo. Contudo uma imperfeição num determinado projecto pode levar a problemas como o congestionamento da rede, acabando por não se cumprir o objectivo do plano e desperdiçando-se recursos e fundos. A existência de falhas é propiciada pela complexidade do método de planeamento de transportes, geralmente composto por numerosas etapas.

O aparecimento e a melhoria das ferramentas de cálculo dedicadas a esta área foram de grande utilidade, designadamente a aplicação de modelos de simulação. De uma forma genérica, os modelos de simulação são representações mais ou menos simplificadas da realidade. Eles permitem conduzir experimentações de modo a compreender o comportamento de um dado sistema e poder avaliar possíveis estratégias.

Ao simular o funcionamento de uma rede estes modelos permitem a sua avaliação e a análise das consequências de se introduzirem alterações ou variantes, uma vez que se consegue processar um grande número de informação com menos recursos.

Esta lógica aplica-se aos modelos de simulação de tráfego, que procuram representar as componentes da rede viária em estudo e suas características, como o fluxo de tráfego. No entanto dever-se-á ter sempre presente que é inevitável recorrer a simplificações, conseguindo-se apenas uma aproximação da realidade.

No entanto, é essencial dominar o modelo que se aplica para poder discernir entre o que são resultados razoáveis e aqueles que resultam de possíveis erros de concepção da rede ou de introdução de dados. A correcta utilização do modelo adequado propicia, por outro lado, uma maior garantia de fiabilidade do que a realização manual das inúmeras tarefas a executar.

De uma forma genérica, o desenvolvimento de um modelo de simulação envolve quatro fases:

- **Codificação** de um modelo que passa pela recolha de dados de uma determinada rede, a sua codificação

- **Verificação** da configuração da rede de modo a detectar os erros mais grosseiros;
- **Calibração** de um modelo que consiste em corrigir os valores das variáveis do modelo responsáveis pela representação das condições de operação, com o objectivo de que as estimativas das medidas de desempenho calculadas pelo modelo reflectam os valores reais;
- **Validação**, processo de determinar quando é que o modelo de simulação representa com suficiente exactidão a realidade, estando nesta fase o modelo apto a produzir informações “fidedignas” relativamente ao desempenho do sistema;
- **Aplicação** do modelo que como última etapa irá permitir de uma forma sistemática a avaliação do desempenho do sistema face a diferentes cenários.

Neste ponto, será importante referir que as fases relativas à calibração e validação do modelo consistem num método iterativo que envolve a calibração de parâmetros e a comparação do modelo com o comportamento do sistema real, sendo estas duas etapas fundamentais para assegurar a credibilidade e fiabilidade do modelo construído.

A simulação é uma ferramenta eficiente para analisar uma larga variedade de problemas dinâmicos, difíceis de analisar de outra forma. Do ponto de vista metodológico, o modelo de simulação é uma técnica que simula as condições reais de uma rede, e que permite realizar análises e previsões quanto a esta, substituindo as experimentações físicas por representações analíticas com recurso a programas de cálculo automático. A possibilidade de retirar conclusões e de testar novas técnicas sem ser necessário perturbar o sistema real e proceder a nova recolha de dados são as grandes vantagens dos modelos de simulação que tornam o seu uso tão importante. Outras potencialidades dos modelos de simulação são não só a avaliação relativa das variáveis envolvidas no processo e a sua relação como também a disponibilização de informação com sequência temporal e espacial, tanto em termos de valores médios como dos seus desvios.

No entanto, os modelos de simulação podem possuir eventuais restrições ou limitações na sua utilização. Nem sempre a simulação é a melhor alternativa para solucionar o problema, é importante que o modelador considere sempre outros recursos alternativos. A simulação exige tempo de modelação, recursos e um volume de informação que nem sempre é fácil de obter. Para que os modelos tenham utilidade é necessário proceder à complexa etapa de calibração e de validação após a verificação da construção, sendo que se as fases forem executadas deficientemente o modelo não terá qualquer funcionalidade. O uso de modelos de simulação exige a compreensão e o conhecimento aprofundado das teorias usadas e das limitações do programa.

Os modelos de simulação são cada vez mais usados devido à existência de sistemas de grande complexidade mas também aos avanços da engenharia de *software* e do *hardware* que tornam os programas de mais fácil utilização e de maior eficácia, sendo actualmente ferramentas utilizadas em diversas áreas tais como na economia, na saúde, nos transportes e nas ciências sociais.

## 1.2. APRESENTAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

### 1.2.1. OBJECTIVOS

Como referido anteriormente a aplicação de modelos de simulação de tráfego no estudo de redes urbanas constitui uma importante ferramenta de base, uma vez que permite testar e avaliar o funcionamento de uma dada estratégia numa infra-estrutura de transportes. No entanto, os resultados obtidos em modelos de simulação deverão ter um significado claro bem como ser adequados à

realidade, pelo que o processo de calibração e posterior validação do modelo são fases indispensáveis para haver confiança nos resultados obtidos.

Deste modo, o objectivo principal do trabalho de investigação proposto consiste em contribuir para a consistência na aplicação de modelos microscópicos de tráfego em redes rodoviárias urbanas, com recurso em particular ao modelo de simulação de tráfego AIMSUN, designadamente na selecção e quantificação dos parâmetros e respectivos critérios de calibração dos modelos.

#### 1.2.2. ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho de investigação foi organizado em seis capítulos, incluindo o presente, onde é apresentado de uma forma sucinta o enquadramento do problema assim como os objectivos e a estrutura da dissertação.

No segundo capítulo procede-se à caracterização dos modelos de simulação de tráfego, de acordo com a pesquisa bibliográfica realizada sobre o tema. Os diferentes tipos de modelos de simulação existentes são descritos, com principal destaque para os modelos microscópicos.

O terceiro capítulo debruça-se sobre a segunda e terceira etapa da construção de um modelo, isto é, o processo de calibração e validação, realçando a importância destas duas fases na fiabilidade dos resultados. Neste ponto foi realizada uma pesquisa exaustiva sobre os parâmetros, os critérios e as metodologias usualmente utilizadas em modelos microscópicos de simulação de tráfego seguindo-se de uma breve análise global.

No quarto capítulo apresenta-se uma descrição do modelo de referência AIMSUN, que compreende o modo de funcionamento e capacidades do programa. De seguida é apresentado o caso de estudo, a delimitação da zona, a codificação e a verificação da rede.

No quinto capítulo procede-se à análise de sensibilidade do modelo direccionada para as variáveis normalmente referenciadas na bibliografia da especialidade. Com base nos resultados finais são analisados os parâmetros utilizados.

No sexto capítulo discutem-se as conclusões mais relevantes e abordam-se as perspectivas de desenvolvimento futuro.

Por último apresentam-se os anexos, onde foram reunidas as informações relativas à recolha de dados *in situ* e os resultados dos testes estatísticos utilizados.



# 2

## MODELOS DE SIMULAÇÃO DE TRÁFEGO

### 2.1. APRESENTAÇÃO

Os primeiros passos no estudo da circulação de tráfego datam dos anos 30 do século XX, com uma teoria probabilística de descrição do tráfego, segundo [1]. Terminada a segunda grande guerra, houve um desenvolvimento da rede viária e da indústria automóvel, que impulsionou novos estudos sobre a circulação de tráfego. No início da década de 50 do século XX surge uma teoria que faz a analogia entre os veículos no tráfego e as partículas num fluido, designada por “*Traffic Flow Theory*” da autoria de Lighthill e Whitham [2]. Este trabalho foi fundamental para uma quantidade de estudos de formulação matemática, resultando em vários modelos que descrevem os diferentes aspectos da teoria.

Com o desenvolvimento tecnológico e a evolução das capacidades dos computadores, tornou-se possível resolver problemas de grande escala de uma forma mais simples. A simulação de tráfego tornou-se uma ferramenta eficaz para determinar os benefícios e os impactos dos projectos a nível dos transportes. O teste de sistemas através da simulação exige menos recursos e possibilita maior segurança, uma vez que não é necessária a sua implementação na rede real. Surgiu uma grande variedade de *software*, que actualmente se discute e compara, uma vez que nem todos derivam dos mesmos pressupostos. As simulações de tráfego tornaram-se cada vez mais simples e eficazes em função da evolução tecnológica, no entanto continua a ser um processo complexo.

Esta diversificação de modelos de cálculo faz com que a escolha do modelo que melhor se adapta ao problema se torne difícil. Outra dificuldade reside na grande variedade de problemas relacionados com a modelação de transportes, pelo que a escolha deve ser condicionada à situação em apreço.

### 2.2. DESCRIÇÃO

Os modelos de simulação reproduzem, com maior ou menor nível de precisão a interacção entre os veículos, os seus operadores e as infra-estruturas, sendo caracterizadas as condições de circulação numa determinada rede devido a uma relação de oferta/procura. O carácter dinâmico de variação destas condições pode ser reflectido através da divisão do tempo em pequenos intervalos, onde é possível representar, tanto ao nível do tempo como do espaço, o desempenho da rede.

Estes modelos podem ser classificados de acordo com algumas características fundamentais, descritas nos pontos seguintes.

### 2.2.1. NÍVEL DE DETALHE

Os modelos de simulação podem ser classificados de acordo com o nível de detalhe que conseguem representar. A classificação tem em conta as entidades consideradas e o seu nível de descrição, podendo-se dividir da seguinte forma:

**Sub-microscópicos:** modelos com maior nível de detalhe, descrevendo o funcionamento de partes do veículo, o seu comportamento pormenorizado e do seu condutor (por exemplo a mudança de velocidade na caixa);

**Microscópicos:** avaliam o tráfego detalhadamente representando cada veículo como uma entidade;

**Mesoscópicos:** nível de detalhe intermédio não distinguindo os veículos como elementos singulares, mas sim como pelotões;

**Macroscópicos:** calculam o tráfego como um todo (“fluído”), não fazendo distinção entre as partes que o constituem.

### 2.2.2. ESCALA TEMPORAL

Nesta dimensão poder-se-á distinguir os modelos estáticos, em que variáveis como a procura permanecem constantes ao longo do período temporal em estudo, e os modelos dinâmicos que permitem a sua variação.

No caso de modelos dinâmicos é natural classificar os modelos tendo em conta a escala temporal como variável independente.

**Modelos contínuos:** descrevem as mudanças no tráfego de forma ininterrupta no tempo, num sistema de solicitações contínuas;

**Modelos discretos:** consideram que as alterações no tráfego acontecem de forma descontínua no tempo, podendo ser discriminados dois tipos de modelos discretos em função do tempo e do “evento”; o primeiro segmenta o tempo em intervalos de tempo discretos enquanto que o segundo modelo caracteriza o sistema através de certos elementos que se alteram – os eventos, tais como por exemplo o estado dos sinais luminosos;

Existem outras variáveis independentes que podem ser descritas de uma forma contínua ou discreta tais como a velocidade ou a posição do veículo.

### 2.2.3. REPRESENTAÇÃO DO PROCESSO

A representação do modo de comportamento dos veículos numa rede de transporte pode ser realizado tendo por base duas abordagens, nomeadamente:

**Determinística:** comportamento é conhecido para todos os intervenientes, sendo portanto um processo que descreve as variáveis de uma forma analítica não tendo em atenção a aleatoriedade;

**Estocástica:** reflecte a natureza aleatória/ocasional bem como probabilística das variáveis intervenientes.

Observe-se que o modelo de interacção entre veículos pode ser formulado como uma relação determinística ou estocástica dependendo se o tempo de reacção do condutor do veículo é uma constante ou um valor aleatório respectivamente.

### 2.3. MODELOS MICROSCÓPICOS VERSUS MODELOS MACROSCÓPICOS E MESOSCÓPICOS

A classificação de modelos mais usual é em relação ao seu nível de detalhe: microscópicos, mesoscópicos e macroscópicos, representados na figura 2.1, sendo de referir que o nível de análise também depende da escala que se pretende utilizar.

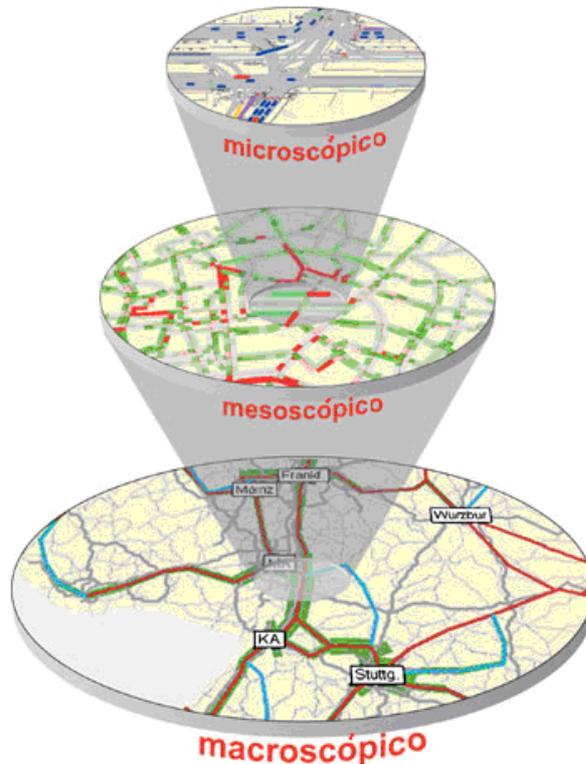


Fig. 2.1 – Nível de detalhe dos modelos, fonte [3].

Os modelos microscópicos descrevem os seus elementos e as interações entre as entidades com grande detalhe. A caracterização faz-se a nível espacial e temporal, exemplo dos modelos de mudança de via, de interação entre veículos e de intervalo crítico. Este modelo depende do comportamento dos condutores e das características dos seus veículos, sendo as variáveis mais utilizadas a velocidade individual, o tempo e a distância entre veículos. Deste modo, consegue-se uma representação mais “realística” da forma como os veículos circulam na rede, no entanto, requer uma maior quantidade de dados e tempo de codificação.

Um tipo diferente de modelos de tráfego é o macroscópico, em que se descreve o tráfego com um elevado nível de agregação em que acções tais como a mudança de via não são consideradas. Por esta razão, estes modelos requerem uma menor capacidade computacional, mas são incapazes de prever/avaliar variáveis a nível do veículo, como por exemplo o consumo de combustível e, conseqüente, certos impactos de uma forma mais detalhada. Os modelos macroscópicos são caracterizados por variáveis como a concentração, o débito, a taxa de ocupação, a velocidade média no espaço e no tempo.

De acordo com a figura 2.1, os modelos mesoscópicos possuem um nível de detalhe intermédio, incorporando aspectos dos modelos microscópicos e macroscópicos. Os modelos mesoscópicos não

distinguem o comportamento individual dos veículos, mas especificam o comportamento individual por exemplo de uma forma probabilística. A representação dos veículos é realizada por meio de pelotões, pequenos grupos de veículos agregados. As atividades e interação entre veículos são descritas com um nível de detalhe reduzido. Normalmente os resultados dos modelos microscópicos são agregados para uso em modelos mesoscópicos, reduzindo assim o tempo necessário para a simulação.

Uma vez definidos os três tipos de modelos, de seguida vão ser apresentados de acordo com a sua aplicabilidade.

Os modelos microscópicos são de grande utilidade para testar a geometria da rede. No entanto, vários especialistas em modelação de tráfego defendem que os modelos microscópicos não são capazes de produzir informação fiável acerca de variáveis macroscópicas como a capacidade e o comprimento das filas de espera, devido à inexistência de algumas variáveis neste tipo de modelo e devido à dependência não linear dos resultados do modelo em relação a essas variáveis.

Os modelos macroscópicos são de grande aplicabilidade, principalmente em processos onde as características macroscópicas como os volumes são os resultados de maior interesse. Contudo ao contrário do que acontece com os modelos microscópicos, nos modelos macroscópicos, de um modo geral, a descrição de detalhes micro é realizada de um modo muito simplista, como por exemplo a alteração da topologia da rede

Os modelos mesoscópicos têm a vantagem de descrever o comportamento individual dos veículos, sem necessitarem de descrever o seu comportamento ao longo do tempo e do espaço. Segundo a referência [2], tal com os modelos microscópicos, os mesoscópicos são constituídos por uma grande quantidade de parâmetros, que dificultam a sua calibração e aplicabilidade em tempo real.

No quadro 2.1 é apresentada uma tabela onde os modelos macroscópicos e microscópicos são apresentados e avaliados de acordo com certos aspectos fundamentais para a modelação.

Quadro 2.1. – Comparação dos modelos micro versus macroscópicos, fonte [4].

Modelo	Macroscópico	Microscópico
Global	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Os veículos e as viagens são modelados em grupos;</li> <li>▪ Os volumes de tráfego são reproduzidos em modelos estáticos, sendo o resultado representado por um valor médio;</li> <li>▪ Tempos de simulação curtos;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Os veículos e as viagens são modelados individualmente;</li> <li>▪ Simulação dinâmica em tempo real;</li> <li>▪ Usualmente, tempos de simulação longos;</li> </ul>
Velocidade Capacidade	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Todas as viagens partilham a mesma velocidade em determinado elemento da rede;</li> <li>▪ A capacidade do modelo é um dado de entrada;</li> <li>▪ O congestionamento é inexplicável, a velocidade é uma função estritamente dependente do volume;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Cada viagem/veículo possui uma velocidade individual em reacção aos veículos e aos sinais de controlo;</li> <li>▪ Capacidade não é um dado de entrada mas o resultado da geometria e do comportamento do condutor;</li> <li>▪ Pode reproduzir pontos de congestionamento e a geração de filas de espera;</li> </ul>
Nível de Detalhe	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Simplificadamente modela a intersecção como um ponto sem geometria.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Cada intersecção é representada ao detalhe por vários elementos.</li> </ul>

De acordo com a natureza do problema, deve-se optar pelo modelo que responde de modo mais fácil e rápido às questões inicialmente impostas. O modelo deve ser complexo apenas na medida do necessário, uma vez que quanto mais complexo for mais recursos necessita e maior a probabilidade de ocorrência de erros.

Os modelos macroscópicos são muitas vezes os preferidos para aplicação, uma vez que são mais simples e rápidos que os modelos microscópicos de simulação. No entanto, há situações onde os modelos macroscópicos são insuficientes e é recomendada a simulação de tráfego com modelos microscópicos uma vez que os primeiros não conseguem representar grande nível de detalhe, por não possuírem a capacidade de simular a interacção entre veículos individuais.

A evolução da capacidade dos computadores promove o uso de programas de modelos microscópicos de tráfego que são mais precisos e adaptáveis a casos especiais, sendo este tipo cada vez mais utilizado. No entanto, o aumento do detalhe de simulação dificulta o processo de calibração e potencia o erro por parte do modelador, pelo que e face a imprevistos, as aplicações de simulação requerem geralmente a um maior dispêndio de recursos do que inicialmente previsto. Deste modo, os projectos de simulação devem ser devidamente planeados para que os recursos dispendidos pelo modelador sejam empregues da forma mais produtiva e eficaz.

## 2.4. CARACTERIZAÇÃO DOS MODELOS MICROSCÓPICOS

Os modelos de simulação microscópicos pretendem reproduzir a dinâmica individual de cada veículo na rede, tendo em conta quer as características do veículo quer as do condutor. A teoria de base deste modelo é designada por interacção entre veículos, que considera que o condutor reage de forma concordante com o veículo que segue à sua frente. Existem três sub-modelos que derivam desta teoria, o modelo da distância segura, o modelo de estímulo-resposta e o modelo do espaço.

Os modelos microscópicos de simulação foram criados para facilitar a tarefa de análise de sistemas de tráfego e são muito úteis para testar novos sistemas de controlo de tráfego e políticas de gestão. Na última década, os modelos de micro-simulação têm vindo a ganhar popularidade como uma ferramenta prática de análise de tráfego. Nos dias de hoje existe uma grande variedade de programas de micro-simulação tais como, por exemplo, o modelo PARAMICS (Grã-Bretanha), o modelo AIMSUN (Espanha), o modelo CORSIM (Estados Unidos da América) e o modelo VISSIM (Alemanha). Este tipo de *software* permite testar e avaliar opções de estradas e futuras condições de escoamento de tráfego, ainda em fase de projecto.

Em 1999 foi publicado um importante estudo financiado pela Comissão Europeia, o projecto SMARTTEST (*Simulation Modelling Applied to Road Transport European Scheme Tests*) [5]. Este projecto foi realizado num período de dois anos, ao longo do qual foram reunidas as informações da pesquisa bibliográfica e de um questionário distribuído a todas as entidades responsáveis pelo desenvolvimento de um modelo microscópico de simulação (tendo sido obtidas trinta e duas respostas). Os próprios autores do estudo são algumas das entidades responsáveis por desenvolvimento de modelos e são provenientes de cinco países (Grã-Bretanha, Itália, Espanha, França e Suécia). O objectivo deste estudo era resumir a informação existente sobre os modelos microscópicos de simulação de modo a identificar os principais problemas e necessidades existentes.

Actualmente existem cerca de cinquenta e sete modelos microscópicos de simulação. De acordo com os questionários devolvidos, os modelos mais utilizados são o NETSIM, o INTEGRATION, o NEMIS, o CORSIM, o HUTSIM, o VTI, o TRARR e o AIMSUN. No ponto seguinte apresenta-se um resumo do estudo realizado sobre este tipo de modelos.

### 2.4.1 CLASSIFICAÇÃO DOS MODELOS MICROSCÓPICOS

Numa primeira etapa os modelos de simulação foram classificados segundo o tipo de situação de tráfego que simulam, designadamente as redes urbanas, as inter-urbanas, as mistas ou outros, como indicado no quadro 2.2.

Quadro 2.2. – Os quatro tipos de modelos de micro-simulação, fonte [4].

Urbano	Inter-urbano	Misto	Outro
CASIMIR	AUTOBAHN	AIMSUN2	ANATOLL
DRACULA	FREEVU	CORSIM	PHAROS
HUTSIM	FRESIM	FLEXSYT II	SHIVA
MICSTRAN	MIXIC	INTEGRATION	SIMDAC
NEMIS	SISTM	MELROSE	
NETSIM		MICROSIM	
PADSIM		MITSIM	
SIGSIM		PARAMICS	
SIMNET		PLANSIM-T	
SITRA-B +		TRANSIMS	
SITRAS		VISSIM	
THOREAU			

Os modelos urbanos, inter-urbanos ou mistos dizem respeito ao tipo de estrada que constitui a rede, influenciando assim o tipo de objectivos do modelo.

Os modelos do tipo “outros” foram concebidos para objectivos muito específicos, tais como a modelação do nível tático da condução e a análise de algoritmos (a fim de ajudar a escrever programas de condução de veículos no tráfego), para prestar a informação detalhada de um ambiente simulado num robô de condução automóvel, para avaliar as condições de segurança e conforto de uma linha de carros em uma única faixa ou para simular estratégias e para prever filas nas portagens.

De acordo com a natureza do modelo e o tipo de redes para as quais foi desenvolvido este possui capacidades distintas.

#### 2.4.1.1. Meio Urbano

Geralmente os modelos de micro-simulação são desenvolvidos com o objectivo de analisar redes urbanas, tendo a maior parte destes modelos a capacidade de modelar as funções básicas de ITS (*Intelligent Transport System*). No quadro 2.3. encontra-se as funcionalidades de cada modelo microscópico para simulação em meio urbano.

Quadro 2.3. – Funcionalidades dos modelos urbanos de micro-simulação, fonte [5]

	CASIMIR	DRACULA	HUTSIM	MICSTRAN	NEMIS	NETSIM	PADSIM	SIGSIM	SIMNET	SITRA-B+	SITRAS	THOREAU
<b>Funções modeladas ITS</b>												
Coordenação de semáforos		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Sinais luminosos actuados	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Prioridade ao transporte público		✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓		
Rampas de Ligação			✓	✓				✓	✓			✓
Controlo de volumes alta velocidade								✓				
Gestão de incidentes					✓	✓		✓	✓	✓	✓	
Zonas de acesso controlado				✓	✓		✓					
Painéis de mensagem variável			✓		✓				✓			✓
Informação de tráfego regional												
Gestor de rotas estáticas			✓	✓	✓				✓	✓	✓	✓
Gestor de rotas dinâmicas				✓	✓		✓		✓	✓	✓	✓
Gestão parques estacionamento				✓					✓	✓		
Informação transporte público								✓				
Portagens de débito automático			✓									
Custos		✓										
Controlo de velocidade adaptável			✓	✓	✓		✓	✓	✓			
Sistema automático controlo												
Veículos autónomos			✓					✓				
Peões e ciclistas			✓									
Veículo teste			✓		✓			✓		✓		✓
Detectores veículos	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
<b>Objectos e fenómenos modelados</b>												
Condições atmosféricas		✓		✓								✓
Procura de lugar estacionamento						✓				✓		
Veículos estacionados no parque				✓		✓	✓	✓	✓	✓		✓
Modelo de motor elaborado					✓				✓			
Veículos comerciais		✓		✓	✓	✓		✓		✓	✓	
Bicicletas / Motociclos			✓					✓				
Peões			✓	✓		✓						✓
Incidentes		✓	✓		✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓
Veículos de transporte público		✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓		
Medidas de acalmia de tráfego			✓		✓				✓			✓
Estudo de filas espera		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Entrecruzamento		✓	✓	✓		✓		✓		✓	✓	✓
Rotundas		✓	✓		✓	✓	✓		✓	✓		✓

#### 2.4.1.2. Meio Inter-urbano

A maioria dos modelos para vias inter-urbanas concentraram o seu desenvolvimento na capacidade de reproduzir a complexa geometria das actuais redes rodoviárias de “maior” velocidade, ou seja, em que o desempenho da rede depende dos arcos e não dos nós, sem esquecer os elementos de rampas

principais, de controlo de velocidade e painéis de mensagens variáveis (VMS) utilizados para gerir o tráfego. No quadro 2.4 são apresentadas de uma forma sintética as funcionalidades dos modelos inter-urbanos microscópicos.

Quadro 2.4. – Funcionalidades dos modelos de meio “inter-urbano” de micro-simulação, fonte [5].

	Autoboln	FREEVU	FRESIM	MIXIC	SISTM
<b>Funções modeladas ITS</b>					
Coordenação de semáforos	✓				
Sinais luminosos actuados	✓				
Prioridade ao transporte público					
Rampas de Ligação	✓		✓		✓
Controlo de volumes alta velocidade	✓		✓	✓	✓
Gestão de incidentes	✓		✓		
Zonas de acesso controlado	✓				
Painéis de mensagem variável	✓				✓
Informação de tráfego regional	✓				
Gestor de rotas estáticas	✓				✓
Gestor de rotas dinâmicas	✓				
Gestão parques estacionamento	✓				
Informação transporte público					
Portagens de débito automático	✓				
Custos	✓				
Controlo de velocidade adaptável	✓			✓	
Sistema automático controlo	✓			✓	
Veículos autónomos	✓			✓	
Peões e ciclistas					
Veículo teste	✓	✓			
Detectores veículos	✓	✓	✓		✓
<b>Objectos e fenómenos modelados</b>					
Condições atmosféricas	✓			✓	✓
Procura de lugar estacionamento					
Veículos estacionados no parque					
Modelo de motor elaborado	✓	✓		✓	
Veículos comerciais	✓		✓		✓
Bicicletas / Motociclos					
Peões					
Incidentes	✓		✓		✓
Veículos de transporte público			✓		
Medidas de acalmia de tráfego	✓			✓	
Estudo de filas espera	✓	✓	✓		✓
Entrecruzamento	✓	✓	✓	✓	✓
Rotundas	✓				
<b>Outras propriedades</b>					
Sistema operativo Windows	✓	✓	✓	✓	✓
Sistema operativo UNIX					
Construção interactiva da rede					
Representação gráfica dos resultados		✓	✓	✓	✓

2.4.1.3. Modelos Mistos

Os modelos urbanos e os “inter-urbanos” partilham muitas características, sendo possível converter qualquer tipo de modelo num modelo multiusos, que pode lidar com uma ou ambas as situações (modelo misto). No caso do modelo CORSIM foi utilizada uma abordagem diferente, articulando-se o simulador urbano NETSIM com o simulador de inter-urbano FRESIM para produzir o modelo misto. Será de referir que a existência de vias rápidas dentro das cidades torna fundamental que existam modelos capazes de modelar os dois tipos de rede com o mesmo programa.

No que concerne à calibração e validação dos modelos mistos, as conclusões são semelhantes às dos modelos urbanos (no trabalho citado, apenas se refere o modelo Paramics que foi validado em ambas as condições de zonas urbanas e via rápidas). Para as condições urbanas, os resultados da simulação, em termos de volumes, foram comparados com os dados observados, em situações de congestionamento; para as condições em meio inter-urbano, a validação foi realizada em relação à utilização da via, às manobras de mudança de via e à distribuição de velocidade.

Quadro 2.5. – Funcionalidades dos modelos combinados de micro-simulação, fonte [5].

	AIMSUN2	CORSIM	FLEXSYT-II	INTEGRATION	MELROSE	MICROSIM	MITSIM	Paramics	PLANSIM-T	TRANSIM	VISSIM
<b>Funções modeladas ITS</b>											
Coordenação de semáforos	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓		✓
Sinais luminosos actuados	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓
Prioridade ao transporte público		✓	✓	✓					✓		✓
Rampas de Ligação	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓
Controlo de volumes alta velocidade		✓	✓	✓	✓		✓	✓			✓
Gestão de incidentes	✓	✓	✓	✓			✓	✓			
Zonas de acesso controlado	✓		✓		✓			✓	✓		
Painéis de mensagem variável	✓			✓			✓	✓	✓		
Informação de tráfego regional								✓	✓		
Gestor de rotas estáticas	✓			✓	✓	✓	✓	✓	✓		
Gestor de rotas dinâmicas	✓			✓	✓	✓	✓	✓	✓		
Gestão parques estacionamento									✓		
Informação transporte público				✓							✓
Portagens de débito automático	✓		✓	✓	✓		✓	✓			
Custos				✓	✓			✓	✓		
Controlo de velocidade adaptável					✓						
Sistema automático controlo					✓			✓	✓		
Veículos autónomos					✓						
Peões e ciclistas			✓								✓
Veículo teste				✓	✓		✓	✓	✓		✓
Detectores veículos	✓		✓	✓	✓		✓	✓			✓

	AIMSUN2	CORSIM	FLEXSYT-II	INTEGRATION	MELROSE	MICROSIM	MITSIM	Paramics	PLANSIM-T	TRANSIM	VISSIM
<b>Objectos e fenómenos modelados</b>											
Condições atmosféricas							✓	✓			
Procura de lugar estacionamento		✓						✓		✓	
Veículos estacionados no parque		✓			✓		✓				✓
Modelo de motor elaborado							✓				✓
Veículos comerciais		✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓
Bicicletas / Motociclos			✓								
Peões		✓	✓		✓						✓
Incidentes	✓	✓	✓	✓			✓	✓			✓
Veículos de transporte público	✓	✓	✓	✓				✓	✓	✓	✓
Medidas de acalmia de tráfego			✓	✓			✓	✓			✓
Estudo de filas espera	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓
Entrecruzamento	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓		✓
Rotundas	✓	✓	✓	✓			✓	✓	✓		✓
<b>Outras propriedades</b>											
Sistema operativo Windows	✓	✓	✓	✓			✓				✓
Sistema operativo UNIX	✓			✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Construção interactiva da rede	✓		✓		✓						✓
Representação gráfica dos resultados	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Segundo a informação recolhida pelo projecto SMARTTEST [5], os modelos de simulação microscópica devem possuir indispensavelmente as seguintes funcionalidades:

- Sinais luminosos coordenados;
- Sinais luminosos actuados;
- Afectação de percursos dinâmicos;
- Rampa de ligação (*Ramp metering*);
- Painéis de Mensagem Variável (*VMS*);
- Prioridade a uma classe de veículos;
- Detecção de veículos;
- Gestão de incidentes.

Estas potencialidades são definidas no capítulo 4, aquando da descrição do caso de estudo.

#### 2.4.2 DESCRIÇÃO DOS DIVERSOS MODELOS MICROSCÓPICOS

Apesar de se terem identificado quase seis dezenas de modelos microscópicos, apenas se analisam neste ponto os que foram descritos de forma individual no estudo [5], nomeadamente os modelos desenvolvidos pelos autores do projecto.

O modelo AIMSUN desenvolvido no Departamento de Estatística e Investigação Operacional, na Universidade Politécnica da Catalunha é descrito no capítulo 4, uma vez que é o programa de simulação usado no caso de estudo desta dissertação.

O modelo DRACULA (*Dynamic Route Assignment Combining User Learning and Micro-Simulation*) é um modelo de simulação microscópico de tráfego, concebido e desenvolvido no Instituto de Estudos dos Transportes, da Universidade de Leeds. Este modelo tem funcionalidades para modelar “eficazmente” as intersecções giratórias, os serviços de transporte público, os sinais luminosos de controlo actuado e os detectores.

O modelo NEMIS foi concebido de modo a possibilitar a simulação das redes urbanas em detalhe microscópico (veículos individuais, intersecções ou secções) tornando-o um instrumento valioso para testes de estratégias de controlo de tráfego. NEMIS é um *software* que desde a sua criação, tem sido usado principalmente para a investigação e para aplicação profissional. Ele foi desenvolvido para a micro-simulação de tráfego urbano (público e privado), sendo aplicável a redes “pequenas”, “médias” e “grandes”.

O modelo SITRA-B + (*TRAffic Simulation*) é capaz de modelar redes urbanas de média dimensão, incluindo intersecções complexas e é particularmente adequado para a avaliação de estratégias em tempo real como prioridade a veículos de transporte público e estratégias de orientação de percursos. A simulação é microscópica, ou seja, cada veículo é uma entidade individual. A mudança de estado de simulação ocorre em momentos discretos, o modelo de interação entre veículos é uma combinação linear de velocidade relativa e intervalo crítico entre o veículo considerado e o seguinte. A versão actual é escrita em linguagem C ++.

#### 2.4.2.1. Avaliação dos Modelos

Os utilizadores questionados pelo projecto SMARTTEST [5] responderam quais eram as vantagens dos modelos microscópicos mais comuns. No quadro 2.6. é apenas apresentada a informação para os modelos anteriormente descritos.

Quadro 2.6. – Vantagens de alguns modelos, fonte [5].

Modelo	Vantagens
<b>AIMSUN</b>	Excelente grafismo na construção da rede e nos dados de saída;
<b>DRACULA</b>	Muito boa representação do tráfego real através de um conjunto de parâmetros; Capacidade de importar ficheiros em formato SATURN;
<b>NEMIS</b>	Inclui função de afectação; Acesso à codificação do programa informático;
<b>SITRA –B +</b>	Vasto conjunto de tipo de veículos; Interface com estratégias de controlo e algoritmos; De utilização simples;

O projecto SMARTTEST [5] também especifica as desvantagens salientadas pelos utilizadores, que são apresentadas no quadro 2.7.

Quadro 2.7 – Desvantagens de alguns modelos, fonte [5].

Modelo	Desvantagens
AIMSUN	Dificuldade em especificar as medidas exactas como o comprimento ou largura de uma secção uma vez que é executado de um modo gráfico;
DRACULA	Ausência de opções como: trabalhos na estrada, intersecções giratórias; Carência de representação gráfica; O uso do programa não é “amigável”;
NEMIS	Reduzido número de interfaces; A codificação é executada por comandos escritos; Impossibilidade de codificação de intersecções giratórias;
SITRA-B +	A introdução dos dados de entrada não é executada de uma forma “amigável”;

## 2.5. IMPORTÂNCIA DOS MODELOS MICROSCÓPICOS

A micro-simulação é utilizada para a avaliação prévia ou em paralelo com a operação real. Isso abrange muitos objectivos, tais como o estudo da dinâmica para controlo do tráfego, sistemas de gestão ambiental e de incidentes, estratégias de orientação de percursos em tempo real, controle adaptativo em intersecções semaforizadas, controlo de rampas de ligação (*ramp metering*), portagens e sistemas de controle de vias (vias com sinais, cobrança de portagem electrónica, etc.). Por outro lado, alguns modelos tentam avaliar o impacto e a sensibilidade de concepção alternativa de parâmetros (número de vias, comprimento de rampas de ligação, grau de curvatura e mudança de via). Note-se que isto não significa que todos os modelos são concebidos para tratar todos estes pontos.

Os modelos de micro-simulação possibilitam uma visão geral das condições de tráfego o que torna mais simples encontrar uma possível solução e novas técnicas, que podem ser testadas sem perturbar as redes reais. As principais vantagens deste tipo de modelos segundo o estudo [5] são:

**Simulação de redes**, incluindo a interacção entre veículos, novos sistemas de controlo e de informação. O principal objectivo destes modelos é avaliar um conjunto de transportes com um conjunto de opções. A avaliação real é extremamente difícil uma vez que a variabilidade do tráfego de dia para dia torna difícil e dispendiosa a recolha de dados reais para reproduzir conclusões válidas.

**Previsão a curto prazo**. Inclui a avaliação em tempo real de um conjunto de possíveis intervenções na sequência de um acidente ou para prever emissões de poluição dos veículos.

**Afectação**. Permite prever a mudança de volumes de tráfego em função de uma nova distribuição de viagens quando são realizadas alterações à rede rodoviária.

**Fornecimento de dados a simuladores de condução automóvel**, no sentido de sofisticados simuladores estarem a ser desenvolvidos para permitir a avaliação de novos sistemas em total ambiente de segurança.

## 2.6. ÁREAS A DESENVOLVER NOS MODELOS MICROSCÓPICOS DE SIMULAÇÃO

Os modelos de simulação microscópica são de grande aplicabilidade, possuindo no entanto algumas limitações. Segundo o estudo SMARTTEST [5] foram identificadas as incapacidades mais importantes nos modelos e que devem ser alvo de desenvolvimento, como por exemplo:

**Modelação de Congestionamento.** A maioria dos modelos utiliza algoritmos simples nos modelos de interacção entre veículos e mudança de via para determinar o comportamento do veículo. Durante os períodos de congestionamento estes algoritmos não reflectem as condições reais do comportamento dos condutores. Por exemplo: quando as filas de veículos bloqueiam as passagens numa intersecção ou quando um veículo estaciona ou bloqueia uma faixa. Observe-se que o modo como estas situações de congestionamento são modeladas pode ser crucial para os resultados.

**Modelação Ambiental.** Um considerável esforço tem sido dirigido para produzir modelos de emissões de poluentes para incorporação nos modelos microscópicos de simulação. Para alguns poluentes a modelação é fácil, mas existem outros que resultam de reacções químicas complexas. Também é difícil obter dados fiáveis quando existe uma grande variedade de veículos.

**Compatibilidade de Modelos.** Os modelos são por vezes usados em complementaridade com outros. Existem modelos onde os dados de entrada são os mesmos, tais como as matrizes origem-destino das viagens, a topologia da rede ou os corredores reservados. Contudo, se cada modelo possui um formato diferente de codificação dos dados de entrada, o esforço é duplicado, sendo necessária a reentrada dos dados.

**Avaliação da Segurança.** A segurança é um tema de extrema complexidade. Ainda não é possível prever com precisão as implicações de segurança nos transportes. A maioria dos modelos de segurança faz previsões muito simplistas, baseadas nos volumes de tráfego ou nas alterações da velocidade e ignoram completamente a vulnerabilidade dos ciclistas ou dos peões. É necessário um maior esforço nesta área. Por outro lado, muitos sistemas foram desenvolvidos para responder às alterações das condições de tráfego devido a acidentes, a obras, etc. Para avaliar o provável desempenho desses sistemas o modelo requer obviamente uma quantidade maior de variáveis.

**Nível de Detalhe.** Por vezes é necessário combinar o nível de detalhe da rede com o número de iterações necessárias.

**Calibração e Validação.** Poucos modelos foram rigorosamente calibrados e validados, pelo que é necessário recolher mais dados para que existam critérios de aceitação para os parâmetros.

**Transportes Públicos.** Os veículos de transporte público têm um comportamento distinto dos restantes, mas em muitos casos não são modelados com pormenor suficiente para se distinguirem.

## 2.7. CONCLUSÕES

Como a evolução da capacidade do computador acontece de um modo cada vez mais rápido, esta característica deixa de ser uma limitação na simulação, possibilitando ao modelador a simulação de redes cada vez maiores, mais detalhadas e mais complexas. As simulações serão cada vez mais rápidas, sendo possível executar um maior número de iterações. Por outro lado, o melhoramento do processamento do computador irá permitir aperfeiçoar as interfaces dos programas de modelação e facilitar o seu uso, não sendo necessário despende tanto tempo.

No futuro também será possível melhorar a recolha de dados para a calibração e a validação dos modelos. Por exemplo, a actual difusão da ferramenta GIS (Sistema de Informação Geográfica) tornará a geometria das redes cada vez mais fáceis de modelar, não sendo necessária a sua construção no programa específico em uso. Também o equipamento dos veículos com GPS (Sistema de Posicionamento Global) tornará a recolha de dados um processo mais facilitado.

Uma vez que os modelos de simulação microscópica de tráfego não podem atingir um estado de perfeição, eles apenas poderão prever um possível cenário, que permitirá a avaliação a nível

operacional do projecto de transporte. As capacidades e as limitações destes modelos funcionam como desafios para os utilizadores de modelos. Estes desafios exigem que o modelador esteja consciente dos pressupostos utilizados pelo modelo, os dados requeridos e as limitações dos resultados.



## CALIBRAÇÃO

### 3.1. PREÂMBULO

A construção de um modelo inicia-se pela sua codificação, ou seja, a descrição do sistema de uma forma passível de ser interpretada de uma forma automática. Concluída esta etapa bem como a verificação de possíveis erros, o modelador possui um modelo de simulação para realizar os testes. No entanto, ainda não se pode garantir que se está de facto a simular correctamente a realidade e não uma outra situação “parecida”.

O processo que determina quando é que o modelo está suficientemente próximo do sistema real é usualmente designado por validação do modelo, que consiste num método iterativo que envolve a calibração dos parâmetros do modelo e a comparação do comportamento do mesmo com o sistema real. Estas duas etapas são fundamentais para assegurar a credibilidade do modelo construído

Na figura 3.1 apresentam-se as quatro principais fases de construção de um modelo, com destaque para a etapa descrita neste capítulo.

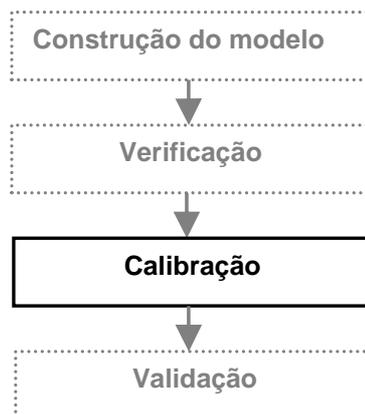


Fig 3.1 – Fases de um modelo

Nesta fase, a calibração, as variáveis do modelo são ajustadas de modo a melhorar a capacidade de reprodução a nível do comportamento dos condutores e das características da rede. Para avaliar o desempenho é necessário definir as variáveis que vão ser alvo de calibração e comparar os valores das amostras de população (valores observados) com os resultantes da aplicação do modelo à rede, os valores simulados.

Aos parâmetros estão associados critérios que funcionam como limites aceitáveis. Quando os parâmetros possuem valores que se encontram dentro dos critérios o modelo é considerado calibrado. O nível de exactidão de um modelo está intimamente ligado aos critérios adoptados, o que faz com que seja de alguma forma um assunto subjectivo e tenha uma grande dependência não só do propósito final como dos recursos disponíveis.

Sendo assim, a calibração de um modelo consiste em corrigir os valores das suas variáveis responsáveis pela representação das condições de operação, com o objectivo de que as estimativas das medidas de desempenho calculadas pelo modelo reflectam os valores reais.

A calibração é a etapa da modelação sobre o qual este estudo mais recai. O objectivo principal é contribuir para a consistência na aplicação de modelos microscópicos em redes urbanas, com recurso ao software AIMSUN. Existem casos em que se procede à calibração de uma forma “habilidosa”, de modo a que o modelo represente uma realidade conveniente. Facilmente se conclui que um modelo criado nestas condições não é capaz de realizar previsões válidas.

A calibração de modelos de simulação é um processo necessário uma vez que não é expectável que algum modelo esteja igualmente apto para todas as condições de tráfego possíveis. Mesmo o modelo mais detalhado, nomeadamente o microscópico, apenas contém um conjunto finito de variáveis que caracterizam as condições de tráfego do mundo real. Nenhum modelo de simulação pode definir a totalidade das variáveis representativas, pelo que todos os modelos devem ser adaptados às condições locais.

Os programas informáticos de modelos microscópicos de simulação possuem um conjunto de variáveis que podem ser definidas e alteradas pelo utilizador do programa para possibilitar a calibração do modelo para as condições locais. De modo a facilitar o trabalho do modelador o programa possui valores definidos por defeito, no entanto devem ser efectuados alguns testes de calibração para verificar se estes se adequam às condições locais.

As variáveis ajustáveis podem ser divididas nas que afectam a simulação de um modo global e as que afectam de uma forma mais localizada. As variáveis globais devem ser as primeiras a ser alvo de calibração. As variáveis locais são calibradas de seguida de modo a refinar os resultados.

### **3.2. VALIDAÇÃO**

Tal como foi referido anteriormente o processo de determinar quando é que o modelo de simulação representa com suficiente exactidão a realidade designa-se por validação, um método iterativo que envolve a calibração de parâmetros e a comparação do modelo com o comportamento do sistema real. A diferença entre estes dois sistemas serve como indicador para melhorar o modelo até ao momento em que se considera que o erro é aceitável. Trata-se, portanto, de validar a calibração efectuada com dados independentes dos utilizados nessa fase.

O processo de validação pode ser distinguido em dois níveis: o conceptual e o operacional. A validação conceptual consiste em identificar e avaliar com base em fundamentos teóricos do modelo, como a teoria do escoamento de tráfego (*traffic flow theory*). Por seu turno, a validação operacional resulta de um processo de comparação entre as previsões do modelo e as medidas no sistema real, sendo dependente do ambiente envolvente. Apesar da existência de dois processos, um não é necessariamente consequente do outro. A validação conceptual, no entanto, é muitas vezes utilizada para explicar valores anómalos encontrados durante a validação operacional.

Na figura 3.2. encontra-se esquematizado o processo de validação.

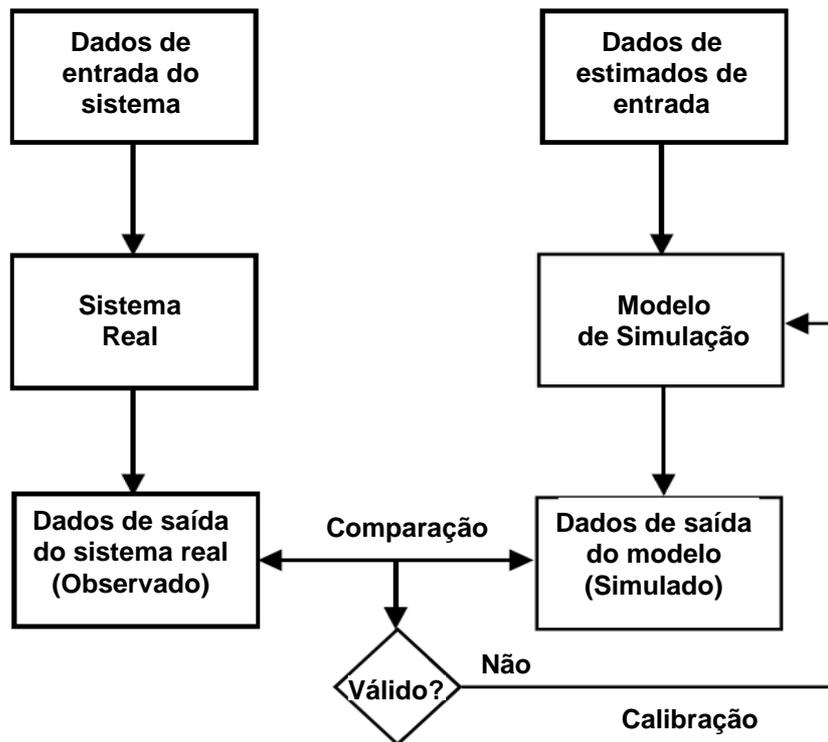


Fig.3.2 – Diagrama de lógica para a validação do modelo, retirado de [6].

De acordo com esta lógica, por cada iteração do processo de validação, o modelo de simulação será executado e sempre que os resultados forem considerados inaceitáveis, será necessário repetir a calibração de alguns aspectos do modelo de simulação, ou seja, ajustar os parâmetros. O processo é repetido tantas vezes quanto as necessárias para que o erro admissível seja atingido.

A validação de um modelo de simulação não é um processo com uma solução binária, isto é, válida ou inválida, depende do grau de certeza desejado que varia consoante o propósito do modelo. De acordo com Richard Shannon, referência [7], nenhum modelo é absolutamente correcto no sentido de não ter uma correspondência directa entre ele próprio e a realidade. Os modelos de simulação naturalmente não são uma procura pela verdade plena, mas sim por uma sucessão de aproximações progressivamente melhores.

Para garantir que o processo representa um modelo válido para o sistema em geral e não é somente representativo de um mero caso particular, devem-se efectuar testes nas fases de calibração e de validação. Estes testes devem utilizar dois grupos de dados distintos e independentes. O primeiro conjunto de dados é usado para a calibração dos parâmetros do modelo, enquanto o segundo grupo é utilizado para fazer correr o modelo calibrado e então validá-lo.

Segundo a bibliografia da especialidade [7], o processo de validação é constituído por duas fases: a escolha das variáveis a validar e os testes a realizar às variáveis escolhidas. Facilmente se compreende que a segunda fase é limitada pela primeira, uma vez que se as variáveis escolhidas não são representativas as conclusões retiradas dos testes não serão os correctos ou não terão interesse prático. A segunda fase pode ser realizada a partir de análises de sensibilidade (Law e Kelton 1991), análises da variância (Garrant 1974, Va Horn 1971), testes estatísticos (Gerlough e Huber 1975), análises de regressão (Van Horn 1971, Taylor 1979), técnicas da série de tempos *standard* (Chen e Sargent 1987,

Schruben 1983), entre outros existentes. A escolha do teste é uma decisão difícil que depende do modelo de simulação usado e do seu propósito.

Observe-se que os dados disponíveis para a calibração/validação são normalmente limitados quer em termos de qualidade quer de quantidade, e existem apenas para localizações pontuais da rede (onde as contagens são executadas) não se reflectindo em todo o sistema.

### 3.3. CALIBRAÇÃO

#### 3.3.1. VARIÁVEIS

As variáveis usualmente sujeitas a calibração podem ser divididas por categorias, de modo a facilitar o procedimento, de acordo com a influência que possuem sobre os elementos da rede. Encontram-se descritos nas secções seguintes (entre parêntesis foram acrescentadas as variáveis dependentes), de acordo com [8].

##### 3.3.1.1. Variáveis Globais

Este tipo de variáveis influencia todos os veículos que circulam na rede independentemente do tipo.

- Tempo de reacção (capacidade da secção);
- Tempo de reacção parado (capacidade da secção);
- Velocidade de saída de fila de espera (comportamento nas yellow box)
- Parâmetros do modelo de mudança de via: “*Lane changing*”, %*overtake* – percentagem de velocidade que o veículo decide ultrapassar entre [0;1] e %*recover* – percentagem de velocidade que o veículo decide reduzir entre [0;1];
- Parâmetros do modelo “*Two lane Car-Following*”: o número de veículos, a distância, a máxima diferença de velocidades.

##### 3.3.1.2. Variáveis da Secção

As variáveis da secção influenciam todos os veículos independentemente do tipo, enquanto circulam numa secção da rede de determinada categoria.

- Velocidade máxima (tempo de viagem, velocidade média);
- Velocidade de viragem (capacidade de viragem, tempo de viragem, velocidade média);
- Distância de visibilidade (comportamento dos sinais verticais de controlo);
- Distância das zonas de mudança de via (proporções de viragem).

##### 3.3.1.3. Variáveis Particulares do Veículo Tipo

Esta categoria de variáveis influencia todos os veículos de determinado tipo quando conduzidos em qualquer parte da rede.

- Velocidade máxima;
- Aceleração máxima;
- Desaceleração normal e máxima;
- Aceitação da Velocidade;
- Comprimento do veículo (comprimento das filas de espera);

- Distância mínima entre veículos (capacidade);
- Intervalo crítico.

### 3.3.2. PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO

O processo de calibração envolve o ajuste de uma grande quantidade de variáveis do modelo (potencialmente uma centena). Diferentes valores assumidos pelas variáveis acarretarão resultados distintos (existe uma correlação). O modelador pode facilmente ficar preso num processo circular, pelo que é essencial possuir uma estratégia para a calibração.

Para facilitar a calibração é conveniente dividir as variáveis em duas categorias. Numa o modelador agrupa as variáveis de que tem certeza dos seus valores e que não deseja ajustar, e numa outra categoria inclui aquelas de que tem menos certeza. O modelador deve manter o segundo conjunto o mais pequeno possível para minimizar os esforços necessários na calibração.

De acordo com a referência bibliográfica [9], o processo da calibração assenta essencialmente em dois resultados finais: o volume de tráfego e a velocidade, podendo existir um outro opcional de acordo com o objectivo do modelo e de carácter mais refinado, como o tempo de percurso. A calibração do volume deve executar-se em primeiro lugar, uma vez que a dificuldade associada é menor. A velocidade é normalmente mais sensível às alterações das condições de tráfego.

#### 3.3.2.1. Parâmetro: Volume

O objectivo desta primeira fase é de aproximar os volumes modelados dos reais. As variáveis que devem ser modificadas nesta fase são as relacionadas com as características dos veículos como: a velocidade, a desaceleração, a aceleração e outros que definem a interacção entre os veículos, como o intervalo crítico.

Primeiro deve-se executar uma simulação inicial onde se adoptam os valores por defeito ou então uma estimativa proposta pelo modelador. Por vezes, as discrepâncias entre resultados não se devem a valores estimados nos modelos mas sim a erros na recolha ou na introdução dos valores da procura no modelo. Uma vez excluída esta possibilidade, o modelador deve-se certificar se a procura gerada aleatoriamente pelo *software* está de acordo com a original. Segundo as referências [10] e [11] dez reproduções são consideradas suficientes.

Os parâmetros devem começar por ser calculados nos detectores junto à entrada da rede. O objectivo é gradualmente ir ajustando os parâmetros e refinando o modelo até todas as secções estarem aceitáveis. Assim que os volumes simulados das primeiras estações estejam próximos dos observados, os parâmetros globais passam a ter pouco efeito e o modelador deve-se então focar nos parâmetros locais.

#### 3.3.2.2. Parâmetro: Velocidade

O objectivo desta segunda fase é aproximar a velocidade simulada o mais possível da observada. Nesta etapa devem-se calibrar os valores globais relacionados com as características dos veículos como a velocidade máxima, a aceleração e desaceleração.

Para comparar a velocidade simulada e a observada usualmente recorre-se à representação gráfica, que permite encontrar de um modo fácil a localização dos “*bottleneck*”. Para identificar um falso “*bottleneck*”, provocado por falta de calibração, as velocidades limites devem ser aumentadas na zona

que se segue ao “*bottleneck*” para que os veículos abandonem o local rapidamente. Contrariamente, para criar um “*bottleneck*”, a velocidade da zona anterior ao elemento deve ser reduzida. Outro modo de resolver ou criar “*bottleneck*” é através da alteração da capacidade de uma secção.

### 3.4. MÉTODOS

Os métodos para a avaliação dos resultados do modelo podem ser de vários tipos: o cálculo de parâmetros, a representação gráfica ou a realização de análises estatísticas com os valores das variáveis simuladas nos diferentes locais para os quais se dispõe de valores observados. Estes parâmetros e análises encontram-se em seguida descritos.

#### 3.4.1. ÍNDICES E REPRESENTAÇÕES GRÁFICAS

A avaliação dos resultados pode ser executada através do cálculo de índices e de representações gráficas. Estes dois métodos estão incluídos na mesma secção uma vez que se encontram muitas vezes associados.

**Erro Quadrático Médio, *RMSE* (Root Mean Squared Error)**, segundo a referência bibliográfica [6]. Possivelmente esta é a maneira mais usada de estimar o erro em simulação de tráfego. Obviamente que quanto menor é o valor do *RMSE*, melhor é o modelo.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (w_{ij} - v_{ij})^2} \quad (3.1)$$

Com:

$w_{ij}$  – volume de tráfego simulado, no arco  $j$  e no intervalo de tempo  $i$ ;

$v_{ij}$  – volume de tráfego observado, no arco  $j$  e no intervalo de tempo  $i$ .

De acordo com a referência bibliográfica [6] o método de validação dos modelos de simulação de tráfego *RMSE* pertence a uma família diferente de testes estatísticos e corresponde à comparação dos valores das séries observadas com as simuladas. Todos os dados de saída (resultados) do programa possuem dois tipos de componentes: a relação funcional e o erro.

$$Data = pattern + error \quad (3.2)$$

A tarefa difícil é estimar quanto valem as partes de modo a poder separá-las, uma forma de o conseguir é através de análise de regressões.

**Porcentagem do Erro Quadrático Médio, *RMSP* (Root Mean Squared Percent Error)** de acordo com a referência bibliográfica [10]. É um método comum para a medição do erro que permite obter uma razoável estimativa inicial entre os valores simulados e os observados. A equação 3.3. permite estimar a percentagem total do erro.

$$RMSP = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{x_i - y_i}{y_i} \right)^2} \quad (3.3)$$

Com:

$x_i$  – volume médio simulado para o tempo  $i$ ;

$y_i$  – volume de tráfego observado para o tempo  $i$ ;

$n$  – número total de observações.

Estes dois parâmetros denominados por *RMSE* e *RMSP* constituem uma boa maneira de medir o desempenho do modelo, sendo o primeiro calculado em termos absolutos e o segundo em termos relativos. Ambos os índices são calculados em termos médios, para isso são executadas uma série de reproduções do modelo de simulação. Associado a cada grupo de repetições existe um único conjunto de valores dos parâmetros do modelo e para cada uma das repetições que compõem o agrupado existe um número aleatório (semente aleatória). Nos modelos microscópicos estocásticos as características dos veículos seguem uma distribuição estatística e o seu valor específico é determinado precisamente pela semente aleatória. Se o número aleatório for diferente é gerado um conjunto de resultados distinto apesar de as características do veículo serem as mesmas.

O número de repetições que devem ser requeridas para determinar o valor do erro quadrático médio para cada conjunto de veículos deve ser determinado pelo modelador, através da estimativa da variância do erro quadrático e compará-lo com a diferença das médias dos erros quadráticos para dois conjuntos de valores de parâmetros do modelo. O número de repetições deve ser de tal forma elevado que a confiança do modelador no valor do erro quadrático médio absoluto ou relativo permita seleccionar de entre dois conjuntos distintos de valores de parâmetros.

**Coefficiente de correlação amostral,  $r$** , de acordo com a referência bibliográfica [10]. Usado para medir a relação entre os valores das condições de tráfego simulados e os observados, que é definido por:

$$r = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sigma_x \sigma_y} \quad (3.4)$$

Com:

$\bar{x}$  - Média dos volumes simulados;

$\bar{y}$  - Média dos volumes observados;

$\sigma_x$  - Desvio padrão dos volumes simulados;

$\sigma_y$  - Desvio padrão dos volumes observados;

$n$  - número de secções estudadas.

Quadro 3.1. – Critério para as estatísticas RMSP e  $r$  segundo [10].

Estatísticas	Critério
RMSP	<15 %
$r$	>0,8

O índice RMSP tem dificuldade de interpretação quando existe uma elevada gama de valores para as variáveis, que é bastante habitual quando se analisam volumes de tráfego. O facto de os valores destas duas estatísticas serem insatisfatórios pode-se dever a valores inapropriados para os parâmetros globais.

Muitas vezes, de modo a possibilitar uma melhor interpretação dos resultados dos cálculos associa-se um gráfico como apresentado em seguida.

**Gráfico de dispersão**, de acordo com a referência bibliográfica [6] e [12]. A representação gráfica das variáveis observadas e simuladas, exemplificada na figura 3.3, tem com objectivo facilitar a detecção visual das divergências entre estes valores. À representação é associada uma recta de regressão e um intervalo de confiança de 95%.

Quanto menor for o  $R^2$  associado e quanto menos forem os pontos fora do intervalo de confiança melhor é o resultado.

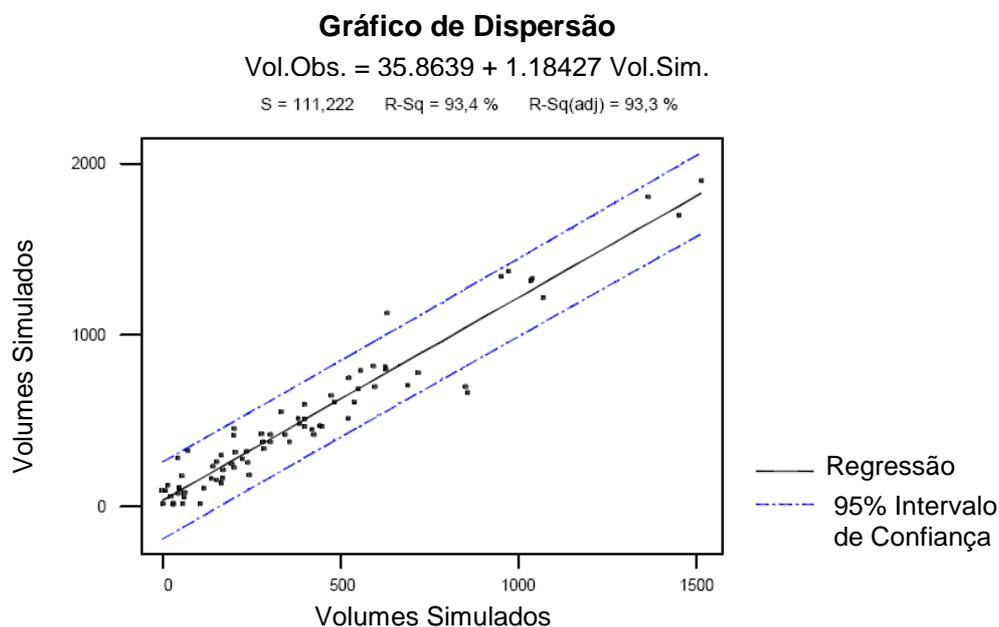


Fig. 3.3 – Exemplo de uma análise por gráfico de dispersão [6] de valores observados e simulados.

Segundo a referência bibliográfica [13], uma outra forma de analisar os valores modelados versus os observados é através de uma representação gráfica, que consiste em introduzir uma recta de regressão linear, com equação  $y = x$ , ou seja, com declive igual a 1. Quanto mais próximos os pontos estiverem

dessa recta, ou seja quanto maior o coeficiente de  $R^2$  (exemplo na figura 3.4), melhor é a qualidade da simulação.

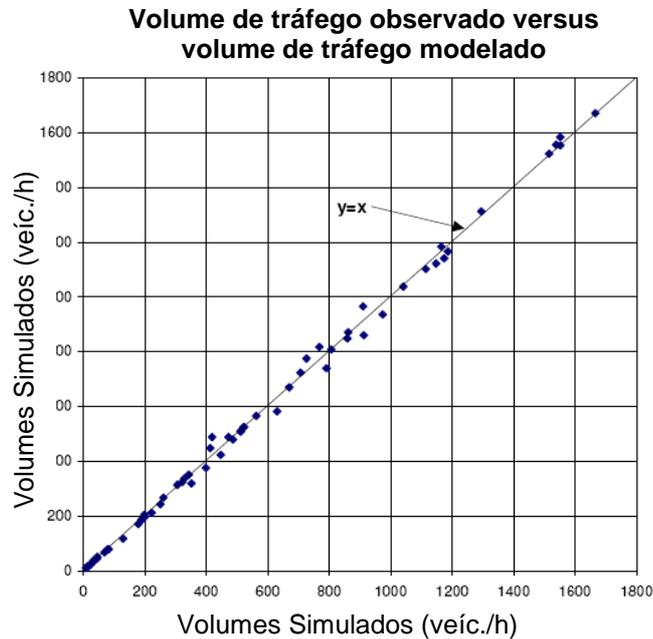


Fig 3.4 – Exemplo de um gráfico de dispersão [13] de valores observados versus simulados, com uma recta de regressão  $y = x$ .

**Análise de Bandas**, análise gráfica de acordo com a bibliografia [7]. Quando a recolha de dados pode ser executada de forma automatizada e durante extensos períodos de tempo (durante  $x$  dias úteis das 7:00h às 9:00h da manhã por exemplo), é possível obter um padrão de valores observados. O padrão de valores simulados é conseguido com reproduções do modelo de simulação independentes. A comparação entre os dados medidos e os dados simulados pode ser por confronto de duas séries de valores, exemplo na figura 3.5.

A comparação entre os resultados pode ser efectuada de três maneiras distintas:

- Caso 1 – As duas séries representadas por valores singulares ou médios;
- Caso 2 – Uma das séries representada por valores médios e a outra no modo de banda;
- Caso 3 – Ambas as séries sob a forma de banda.

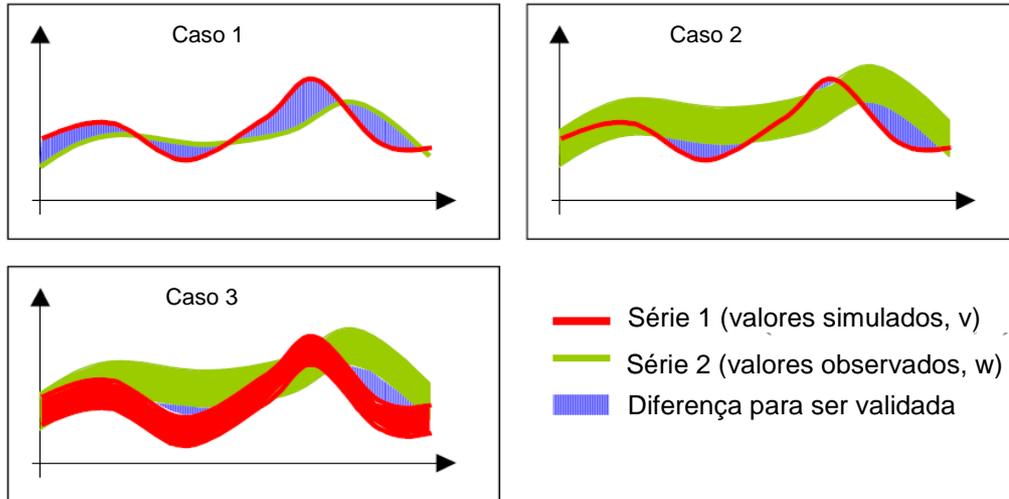


Fig. 3.5 – Possibilidades de comparação de séries, retirado de [6].

A banda representada a cor azul limitada pela linha verde e pela vermelha é a diferença entre os valores observados e os simulados, que deverá ser tão reduzida quanto possível.

**Índice GEH**, de acordo com a referência bibliográfica [6] e [12]. Método baseado no teste estatístico do *chi-quadrado* ( $\chi^2$ ), consiste na comparação dos volumes modelados e observados. Esta estatística pode ser calculada individualmente para cada secção ou então para toda a rede.

$$GEH = \sqrt{\frac{2(x_i - y_i)^2}{x_i + y_i}} \quad (3.5)$$

$$GEH = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{2(x_i - y_i)^2}{x_i + y_i}} \quad (3.6)$$

Com:

$x_i$  – volume de tráfego simulado para o tempo  $i$ ;

$y_i$  – volume de tráfego observado para o tempo  $i$ ;

$n$  – número total de observações.

Este método empírico, que foi sugerido por Geoff Hovers da Câmara Municipal de Londres, deve ser interpretado como a raiz quadrada do produto da diferença absoluta ( $x_i - y_i$ ) pela diferença relativa  $\left( \frac{x_i - y_i}{0,5(x_i + y_i)} \right)$ , podendo assim considerar que a estatística GEH incorpora tanto os erros absolutos

como os relativos. A diferença relativa é calculada com a média dos valores observado e modelado no denominador de modo a evitar eventuais problemas se algum destes valores for nulo.

Citando um exemplo de [14], um erro de 20 em 100 é o equivalente a um erro de 90 em 2000, uma vez que apresentam um GEH semelhante (aproximadamente igual a dois), isto é, o mesmo valor para o parâmetros em duas situações distintas de procura mas para as quais o impacte da diferença entre o observado e o simulado é semelhante.

Um valor de GEH menor que 5 para 85% dos casos de uma secção é um valor aceitável. Para a soma de todas as secções o valor do GEH deverá ser inferior a 4.

Quadro 3.2. – Critério para as estatísticas GEH segundo [9].

Estatísticas	Critério	Observação
GEH (equação 3.3)	<5	Para uma secção individual
GEH (equação 3.4)	≥85%	
GEH (equação 3.3)	<4	Para a soma das várias secções

Os últimos dois métodos expostos, a representação gráfica e o índice de GEH, devem ser aplicados a variáveis globais e agregadas. Independentemente de qual é considerado o melhor, deve-se ter em atenção que este tipo de critério é encarado como um indicador primário para a decisão de rejeição ou aceitação do modelo no caso de um modelo microscópico de simulação.

**Tempo de Viagem**, segundo [9]. Para um percurso definido na rede a diferença entre os tempos modelados e observados não deve ser superior a 15% ou um minuto como limite máximo, em pelo menos em 85% dos casos estudados.

Parâmetro	Critério
$P85 = \% \text{ Ar cos com } \begin{cases}  q_m - q_o  \leq 100 \text{ se } q_o \leq 700 \\ \frac{ q_m - q_o }{q_o} \leq 15\% \text{ se } 700 \leq q_o \leq 2700 \\  q_m - q_o  \leq 400 \text{ se } q_o > 2700 \end{cases}$	≥ 85%
$GEH(\text{individual}) < 5$	≥ 85%
$\overline{GEH}(\text{total})$	<4
$T_p = \% \text{ Percursos com } \frac{ tp_0 - tp_m }{tp_o} \times 100 < 15\% \text{ (ou 1 minuto)}$	≥ 85%

Fig. 3.6 – Alguns critérios definidos na referência bibliográfica [9].

**Erro Métrico**, segundo o artigo [6]. Este parâmetro pretende calibrar o comportamento do modelo *car-following*. Na realidade a distância e a velocidade relativa em relação ao veículo da frente podem ser medidas e gravadas com recurso a um sensor que é colocado no veículo anterior. Estas medições

devem ser efectuadas em zonas de congestionamento da rede uma vez que as condições de escoamento fluído são mais fáceis de reproduzir por qualquer modelo.

$$Em = \sqrt{\sum \left[ \log \left( \frac{d_{sim}}{d_{meas}} \right) \right]^2} \quad (3.7)$$

Com:

$d_{sim}$  – distância entre veículos simulado;

$d_{meas}$  – distância entre veículos teste;

Quadro 3.3. – Valores comparativos do Erro Métrico entre diferentes modelos, segundo [15].

Modelo	Erro Métrico (m)
MITSIM	3,75
Wied/Pel	14,01
Wied/Vis	10,67
NSM	24,51
OVM	9,37
T3M	2,40
AIMSUN	3,47

O valor numérico do erro métrico é distinto consoante o modelo de simulação de tráfego, traduz a distância entre veículos baseado no modelo de interacção entre veículos. A recolha deste valor é um processo difícil.

#### 3.4.2. TESTES ESTATÍSTICOS:

Para a comparação de dois conjuntos de valores existem dois testes estatísticos possíveis de se realizar: Teste *Students-T* e Teste *Theil's* (ou *U-Statistic*). Assim:

**Teste *Students-T***, um teste estatístico de acordo com [6]. Este teste consiste em comparar as séries de valores observados e modelados e determinar se estas são suficientemente parecidas, para todos os detectores seleccionados. Para o detector  $i$  a comparação entre os valores é dada pela equação seguinte (quanto menor o valor  $D_{ij}$  melhor).

$$D_{ij} = w_{ij} - v_{ij} \quad (3.8)$$

Com:

$w_{ij}$  – volume de tráfego simulado, no detector  $i$  no intervalo de tempo  $j$ ;

$v_{ij}$  – volume observado, no detector no intervalo de tempo;

$i$  – este índice identifica o detector ( $i=1,2,\dots,n$ );

$j$  – este índice identifica o intervalo de simulação ( $j=1,2,\dots,m$ ).

Usando a estatística  $T$ :

$$\bar{t}_{m-1} = \frac{\bar{d}_i - \delta_i}{s_d / \sqrt{m}} \quad (3.9)$$

Com:

$\bar{d}_i$  - valor médio de  $D_{ij}$ ;

$\delta_i$  - valor espectável para  $\bar{d}_i$ ;

$s_d$  - desvio padrão de  $\bar{d}_i$ ;

- i) Se  $\delta_i = 1$ , o valor  $\bar{t}_{m-1}$  calculado através do teste *Students-T* pode-se concluir que o modelo não está a reproduzir o comportamento do sistema sendo necessário rejeitar o modelo.
- ii) Se  $\delta_i = 0$ , o valor de  $\bar{t}_{m-1}$  não é significativo e é possível assim concluir que o sistema simulado e o real apresentam um comportamento muito similar. O modelo é aceite.

Este processo é repetido para cada um dos  $n$  detectores. O modelo será aceite quando todos os detectores seleccionados para o estudo passarem no teste, ou seja, apresentarem um valor de  $\delta_i$  aproximadamente igual a zero. É importante realçar que este parâmetro nunca será exactamente igual a zero uma vez que se trata de uma modelação, uma aproximação da realidade.

A amostra dos valores a aplicar neste teste estatístico deve ser do tipo desagregado.

**Teste Theil's U-Statistic**, de acordo com a bibliografia [6] e [10]. Este teste estatístico é um método mais sensível que os descritos anteriormente, como o RMSE, o RMSP e o  $r$ . O resultado do teste pode ser dividido em três coeficientes métricos que possibilitam informações específicas sobre a natureza do erro e semelhança entre as duas séries de dados, a observada  $X_j$  e a simulada  $Y_j$ .

**FRC** (*forecasted relative change*), variação de valores previstas

$$FRC_{j+1} = \frac{Y_{j+1} - X_j}{X_j} \quad (3.10)$$

**ARC** (*actual relative change*) variação de valores observados

$$ARC_{j+1} = \frac{X_{j+1} - X_j}{X_j} \quad (3.11)$$

O teste de **Theil's U-Statistic** é definido por:

$$U = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{m-1} (FRC_{j+1} - ARC_{j+1})^2 / (m-1)}{\sum_{j=1}^{m-1} (ARC_{j+1})^2 / (m-1)}} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{m-1} \left( \frac{Y_{j+1} - X_j}{X_j} \right)^2}{\sum_{j=1}^{m-1} \left( \frac{X_{j+1} - X_j}{X_j} \right)^2}} \quad (3.12)$$

A interpretação mais directa que se pode fazer dos resultados deste teste é a seguinte:

- i) Se  $U=0$ , significa que  $FRC_{j+1}=ARC_{j+1}$  e a simulação é perfeita;
- ii) Se  $U=1$ , significa que  $FRC_{j+1}=0$  e a simulação executada é a pior possível;

No primeiro caso, o i), a variação de valores da simulação é igual à observada.

No último caso, o ii), a previsão da simulação é igual à que seria obtida se não houvesse qualquer alteração aos valores observados. Quando as previsões de  $Y_{j+1}$  são na direcção oposta de  $X_{j+1}$ , o coeficiente de *U-Statistic* será superior à unidade. Se tal acontecer o modelo de simulação deverá ser rejeitado. Quanto mais próximo  $U$  estiver do valor nulo melhor serão os valores simulados, isto é, melhor será o modelo de simulação.

**Erro Quadrático Médio de Previsão:**

$$D_m^2 = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (Y_j - X_j)^2 \quad (3.13)$$

Pode ser decomposto em três parcelas:

$$D_m^2 = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (Y_j - X_j)^2 = (\bar{Y} - \bar{X})^2 + (S_y - S_x)^2 + 2(1-r)S_yS_x \quad (3.14)$$

Onde:

$\bar{X}$  - volumes médios observados;

$\bar{Y}$  - volumes médios simulados;

$S_x, S_y$  - desvio padrão das séries  $X$  e  $Y$  respectivamente;

$r$  - coeficiente de correlação entre as duas séries;

O coeficiente  $U$  pode ser dividido em três componentes, nomeadamente em  $U_M$ ,  $U_S$  e  $U_C$ , que correspondem às três parcelas anteriormente apresentadas. Cada um destes três componentes permite medir diferentes aspectos dos erros entre os valores simulados e observados das condições de tráfego. Estas componentes são:

$$\begin{array}{l}
 U_M = \frac{(\bar{Y} - \bar{X})^2}{D_m^2} \\
 U_S = \frac{(S_y - S_x)^2}{D_m^2} \\
 U_C = \frac{2(1-r)S_y S_x}{D_m^2}
 \end{array}
 \left| \Rightarrow U_M + U_S + U_C = 1 \quad (3.15)
 \right.$$

Onde:

$U_M$  é o índice da “Proporção do Desvio”, que pode ser interpretado como a ferramenta que permite medir o erro sistemático, que permite determinar excessos ou deficiências nas contagens de veículos.

$U_S$  é a componente designada por “Proporção da Variância”, que pode ser usada para medir a capacidade do modelo de simulação em reproduzir o grau de variação/flutuação dos valores originais observados.

$U_C$  é o elemento designado por “Proporção da Covariância”, que permite medir o erro pouco sistemático.

Para que o modelo de simulação microscópica seja considerado representativo da realidade, o coeficiente  $U$  deve adoptar um valor inferior a 0,3,  $U_M$  e  $U_S$  têm de assumir valores que não difiram significativamente de zero e para  $U_C$  é esperado um valor maior, próximo da unidade. Para  $U_M$  e  $U_S$  valores superiores a 0,1 são considerados insatisfatórios. Para o coeficiente  $U_C$  valores inferiores a 0,9 são resultados insatisfatórios.

Quadro 3.4 – Significados dos valores das três componentes de  $U$  segundo [9].

$U_M$	$U_S$	$U_C$	Observação
> 0,1	-	< 0,9	Se um detector apresentar estes valores e o detector seguinte possuir um valor satisfatório de $U_C$ significa que existe um “ <i>bottleneck</i> ” entre os dois detectores, que pode ser real ou gerado pelo modelo.
< 0,1	< 0,1	< 0,9	Indica um excesso de veículos que pode ser devido a um erro nos dados da procura na entrada anterior ao detector ou devido a um erro no número de veículos que saem da rede antes do detector.
> 0,1	-	< 0,9	Significa que existe um erro no comportamento do veículo, que pode ser atribuído à aceleração/desaceleração ou a valores de volumes de saída incorrectos na saída anterior.
> 0,1	> 0,1	< 0,9	Reflecte uma grande variação dos valores dos volumes simulados ou dos observados, que pode ser causada pelos condutores conduzirem os veículos muito próximos uns dos outros. Sendo neste caso apropriado ajustar os valores de aceleração e desaceleração.

Os parâmetros:  $U$ ,  $U_M$ ,  $U_S$  e  $U_C$  podem ser calculados directamente pelos detectores presentes nas secções da rede construída com o auxílio do *software* AIMSUN, como exemplificado na figura 3.7.

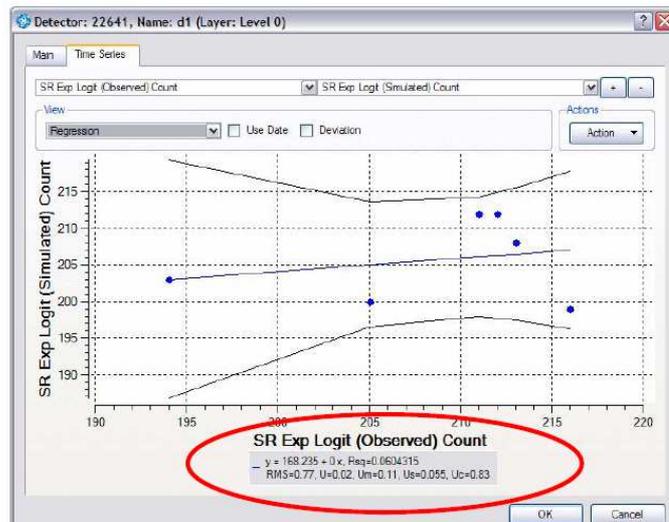


Fig. 3.7 – Exemplo de Teste Theil's U-Statistic calculado pelo AIMSUN para um detector, retirado de [6].

### 3.4.3 AMOSTRAGEM

A avaliação do desempenho de um modelo de simulação de tráfego é usualmente realizada com recurso à comparação de valores medidos no sistema observado com os retirados do modelo de simulação. Assim que os parâmetros estejam escolhidos deverá ser efectuada a recolha de resultados que permitam o seu cálculo. Quando se comparam os valores reais com os valores das variáveis obtidas pelo modelo, é importante assegurar que a recolha de dados é suficiente para caracterização de cada variável e que os valores estão a ser comparados com um dado nível de exactidão. Em redes urbanas esta questão assume ainda um maior relevo face à variabilidade temporal do comportamento do tráfego, com a consequente implicação nos valores das variáveis que o caracterizam.

No caso de redes extensas e compactas, usualmente localizadas em meio urbano, a recolha de dados da totalidade da rede é um projecto de difícil realização devido aos avultados recursos (monetários e humanos) e de tempo necessário. De modo a ultrapassar este problema é prática comum inferir o comportamento do todo com base na amostragem de partes da rede.

Como já foi referido anteriormente a comparação de valores das variáveis modeladas e observadas é necessária mas não suficiente, na medida em que se for utilizado o mesmo conjunto de valores para a fase de calibração e validação do modelo, os resultados podem estar adulterados e não reflectir a realidade. Assim deve-se possuir dois conjuntos de dados distintos, um usado para calibrar e o outro para validar o modelo. De modo a garantir que as amostras são independentes a recolha de dados deverá ser realizada em dois conjuntos de secções distintos. Outra forma de garantir a separação de amostras será definir dois intervalos de tempo diferentes, por exemplo a ponta da manhã e a ponta da tarde. Porém esta última solução exige que haja duas matrizes de procura, uma para cada período.

Segundo a referência bibliográfica [12], o tamanho que a amostra deve possuir é um tema pouco estudado sendo apenas mencionado o número de locais de contagem. O número de locais de contagem é definido em função do tamanho da rede. Para um pequeno esquema dez ou menos contagens são suficientes, se o esquema é maior será indicado possuir no mínimo vinte locais de contagens e serem incluídos mais locais à medida que a rede vai aumentando. Em relação ao tempo que o percurso deve

demorar, que extensão máxima ou mínima deve possuir e que percentagem da rede deve cobrir nada é referido.

As amostras dos valores simulados podem ser classificadas de acordo com o nível de agregação temporal. Denominam-se agregadas as amostras que possuem tempo de simulação suficiente de modo a permitir que os veículos atravessem a rede (dêem entrada e saída). As desagregadas são aquelas que possuem tempo de simulação inferior ao necessário para o atravessamento da rede. A escolha de valores agregados não permite capturar a essência da simulação microscópica, que é a variabilidade dos resultados do fenómeno do tráfego. Os tempos de simulação que correspondem a amostras agregadas e desagregadas dependem do tamanho da rede.

### 3.5. ANÁLISE CRÍTICA DOS PARÂMETROS/CRITÉRIOS

Se analisarmos os métodos que foram descritos anteriormente verifica-se que o volume de tráfego é a variável mais utilizada nos diferentes métodos. O volume de tráfego é um resultado de fácil contabilização, que pode ser executada por simples observação. No entanto esta variável não é suficiente para a validação sendo necessário recorrer a outras variáveis de tráfego tal como o tempo de percurso, que também é focado.

O cálculo dos parâmetros como o  $r$ , por exemplo, tem a vantagem de serem facilmente realizados com o recurso a programas de cálculo automático. Uma desvantagem é que em termos relativos uma diferença de 10 veículos em 100 é igual a 200 veículos em 2000, uma vez que corresponde a 10% do total. Porém, o primeiro caso corresponde a um caso de tráfego fluído em que a diferença de 10% tem um impacto mínimo no sistema, o segundo já pode corresponder a uma secção congestionada, uma vez que o volume presente está próximo da capacidade, podendo a disparidade representar a diferença entre estar na presença de uma situação instável ou estável. Outra limitação destes coeficientes é a de poderem levar a conclusões falsas sobre a qualidade de reprodução do modelo. A soma das diferenças entre valores simulados e modelados pode-se anular, uma vez que o simulado tanto pode ser maior como menor que o observado.

Relativamente aos testes estatísticos é necessário não esquecer que, de uma perspectiva puramente estatística nenhum modelo está completamente correcto uma vez que não é possível a reprodução 100% fiel das observações reais. Os erros são inerentes ao processo de construção de um modelo devido à necessidade de simplificar e de prever.

### 3.6. NÚMERO DE SIMULAÇÕES

Para determinar o número de simulações necessárias a um modelo de micro-simulação para estimar um valor médio de um parâmetro como a velocidade, os volumes de tráfego ou o tempo de viagem de um percurso, o modelador deverá definir:

- Desvio padrão da amostra;
- Nível de confiança desejado;
- Dimensão do intervalo de confiança.

O número de repetições que o modelo terá de realizar é estimado através de um processo iterativo. As primeiras repetições servem para estimar o desvio padrão, que uma vez definido serve para encontrar o número de repetições. A equação 3.16, de acordo com [9], serve para estimar o desvio padrão inicial.

$$s^2 = \frac{\sum (x - \bar{x})^2}{N - 1} \quad (3.16)$$

Com:

*s* - desvio padrão;

*x* - variável;

$\bar{x}$  - valor médio da variável;

*N* - número de repetições, com um valor mínimo de 4

O nível de confiança traduz a probabilidade de o resultado obtido estar dentro do intervalo fixado. Segundo [9] 95% é o valor usualmente escolhido, contudo pode ser definido um valor superior ou inferior. Quanto maior o valor de nível de confiança escolhido maior o número de repetições necessárias.

A dimensão do intervalo é definida pelo modelador de acordo com o propósito do uso do resultado. Quanto menor o intervalo de confiança maior o número de repetições necessárias. De acordo com [6], intervalos de confiança menores que metade do desvio padrão exigem um grande número de repetições para que seja possível considerar um nível de confiança razoável.

De modo a poder ter uma ideia aproximada do número mínimo de repetições necessárias pode-se usar a seguinte equação:

$$CI_{1-\alpha\%} = 2 \times t_{(1-\alpha), N-1} \frac{s}{\sqrt{N}} \quad (3.17)$$

Com:

$CI_{1-\alpha\%}$  - intervalo de confiança;

*t* - Students-T;

*s* - desvio padrão;

Esta equação deverá ser resolvida em ordem a *N*, de modo a determinar o número de iterações necessárias, de acordo com o nível e intervalo de confiança escolhido.

Intervalo Desejado (CI/S)	Confiança Desejada	Repetições Mínimas
0,5	99%	130
0,5	95%	83
0,5	90%	64
1,0	99%	36
1,0	95%	23
1,0	90%	18
1,5	99%	18
1,5	95%	12
1,5	90%	9
2,0	99%	12
2,0	95%	8
2,0	90%	6

Figura 3.8 – Exemplo de aplicação da fórmula, retirado de [9].

## CASO DE ESTUDO

### 4.1. AIMSUN – MODELO MICROSCÓPICO DE SIMULAÇÃO

No capítulo 2 foram definidos os vários tipos de modelos de simulação existentes tendo em conta diversas características (nível de detalhe, escala temporal, representação do processo, etc). Na primeira parte do presente capítulo vai ser apresentado um modelo microscópico em particular, nomeadamente o modelo AIMSUN (*Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-Urban Networks*). Este modelo foi desenvolvido e comercializado pela empresa *Transport Simulation Systems* (TSS) com sede em Barcelona, Espanha [16].

AIMSUN é um simulador microscópico de tráfego que, como tal, permite modelar o comportamento individual de cada veículo da rede durante o tempo de simulação estabelecido e de acordo com as várias teorias de comportamento dos veículos. Este modelo foi desenvolvido e implementado como uma ferramenta de apoio aos engenheiros de tráfego de modo a poderem analisar e projectar modelos de tráfego. Segundo o manual do programa, [17] e [8], AIMSUN tem provado ser muito útil no teste de novos sistemas de controlo de tráfego e na gestão de políticas baseadas na tecnologias tradicionais ou na implementação de Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS - *Intelligent Transport Systems*). O modelo permite ainda estimar o impacte ambiental das emissões de poluição atmosférica e a energia consumida pelos veículos.

Observe-se que no projecto SMARTTEST [5] este modelo foi classificado como de grande aplicabilidade, sendo apto tanto para a análise de redes urbanas como de inter-urbanas, designadamente de auto-estradas.

#### 4.1.1. DESCRIÇÃO

O AIMSUN combina a escala temporal contínua com a discreta, o que significa que existem elementos (veículos) cujo estado se altera continuamente durante a simulação e existem outros elementos (sinais luminosos) que se alteram de forma discreta, isto é, apenas em específicos instantes da simulação.

O modelo possui um alto nível de detalhe de modelação da rede, sendo possível distinguir não só vários tipos de veículos (ligeiros, pesados, autocarros...) bem como diferentes tipos de comportamentos por parte dos condutores. Será ainda de referir que a modelação de peões também é uma possibilidade neste modelo.

As redes físicas são simbolicamente representadas por arcos e nós. Os arcos definem as faixas de rodagem e os nós definem as intersecções ou locais onde as características dos arcos se alteram.

O equipamento existente no sistema real também pode ser representado na rede modelada como é o caso dos sinais verticais, os sinais luminosos de trânsito, os detectores de tráfego e os painéis de mensagem variável (VMS), entre outros.

A nível de sistemas de controlo o modelo AIMSUN permite simular os sinais luminosos e os sinais verticais (STOP e cedência de passagem). O sistema de controlo através de semáforos pode ser de tempos fixos ou de controlo actuado, tendo este último como objectivo ajustar os tempos dos sinais luminosos às condições de tráfego existentes de modo a otimizar a circulação. O controlo actuado pode ser implementado segundo duas filosofias:

- Semi-Actuado, nem todos os movimentos controlados de forma actuada;
- Actuado, todos os movimentos são controlados por detectores.

No que se refere às acções de micro-regulação o modelo AIMSUN admite vários modos, como:

- Eliminação de fase (*no recall*), a fase actuada apenas será activada quando houver detecção de veículos;
- Variação da duração de fases, a fase será sempre activada pelo menos por tempo igual ao mínimo, sendo desactivada quando exceder o tempo máximo de verde ou o valor da extensão;
- Tudo vermelho, todos os sinais luminosos apresentam sinal vermelho. Assim que uma fase seja activada, por passagem de um veículo no detector o sinal correspondente à fase passará imediatamente a verde;
- Verde permanente, a fase que tem o verde activo permanecerá fixa até que outra fase seja activada por detecção.

Outra potencialidade presente no AIMSUN é a de permitir a simulação de medidas de prioridade ao Transporte Público, designadamente a detecção da presença deste tipo de veículos e assim antecipar a fase que lhe dá passagem evitando a sua paragem. Neste caso, o detector deve estar localizado a uma determinada distância da intersecção de modo a dar tempo à mudança de fase (tempo de amarelo e de limpeza) sem que seja necessário interromper a marcha do veículo. O transporte público é o caso mais corrente de aplicação mas podem ser definidos outros veículos para este tipo de controlo adaptativo.

Por defeito o AIMSUN não estabelece nenhum movimento como prioritário numa intersecção, pelo que deverá ser definido para cada movimento o seu nível de prioridade, enquanto na realidade os sinais verticais regulam uma intersecção no seu todo. Em qualquer um dos tipos de sinais, a decisão de atravessar ou aguardar faz-se segundo do intervalo crítico (*gap acceptance*).

#### 4.1.2. MODELAÇÃO DE TRÁFEGO

A codificação da procura depende do tipo de dados disponíveis, existindo no modelo AIMSUN duas formas de simular a circulação dos veículos na rede. A primeira é baseada nos dados referentes aos volumes de tráfego de entrada na rede e as probabilidades de realizarem um dado movimento em cada nó, e a segunda tem por base uma matriz de Origem-Destino.

Na primeira hipótese, os veículos são inseridos nos arcos de entrada e distribuídos aleatoriamente de acordo com as probabilidades de viragem definidas para cada arco da rede. Deste modo, não existe um conhecimento prévio do percurso total de um veículo, apenas se sabe em cada arco qual a probabilidade de optar por determinado movimento.

A procura pode também ser configurada através de matrizes de Origem-Destino, por tipo de veículo, sendo cada uma definida pelo número de viagens entre cada centróide de origem e de destino. O percurso é definido pelo “caminho mais curto” entre o centróide de origem e o de destino.

O intervalo de entrada na rede entre veículos sucessivos é definido segundo uma distribuição que pode ser do tipo: exponencial, uniforme, normal, constante e ASAP (*As Soon As Possible*) em que veículos são carregados na rede assim que existe espaço disponível suficiente.

Independentemente do tipo de programação escolhido para a procura da rede, os veículos podem ser agrupados de duas formas: tipo e classe.

O tipo de veículos permite estabelecer a diferenciação dos veículos que não possuem as mesmas características (ligeiros, comerciais pesados, ambulâncias, motociclos, bicicletas entre outros), sendo cada tipo caracterizado por diferentes variáveis nomeadamente: o comprimento, a largura do veículo, a velocidade máxima, a aceleração máxima, a desaceleração normal e a máxima, o grau de aceitação da velocidade por parte dos condutores, a mínima distância entre veículos, o intervalo crítico, a probabilidade de um veículo seguir determinada recomendação no caso de existirem painéis e tempo de reacção. Observe-se que estes são alguns dos parâmetros que deverão estar sujeitos a calibração e posterior validação.

Na figura 4.1 apresenta-se a caixa de diálogo onde são introduzidas as características dos veículos, exemplificando-se o caso de um veículo tipo ligeiro.

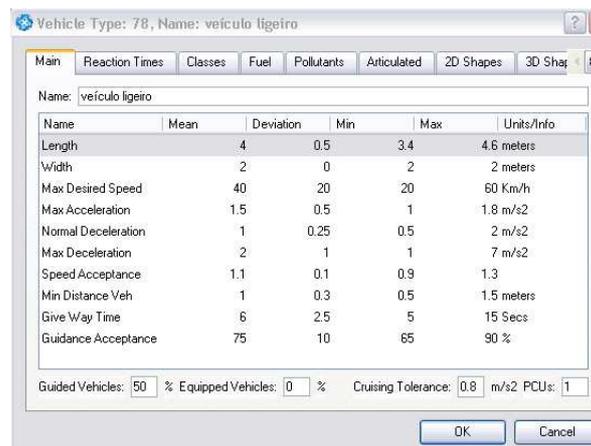


Fig. 4.1 – Variáveis de um tipo de veículo

Em qualquer um dos modos de definição da procura, esta é distinguida consoante o tipo de veículo, assim como a sua representação gráfica durante a simulação (figura 4.2).

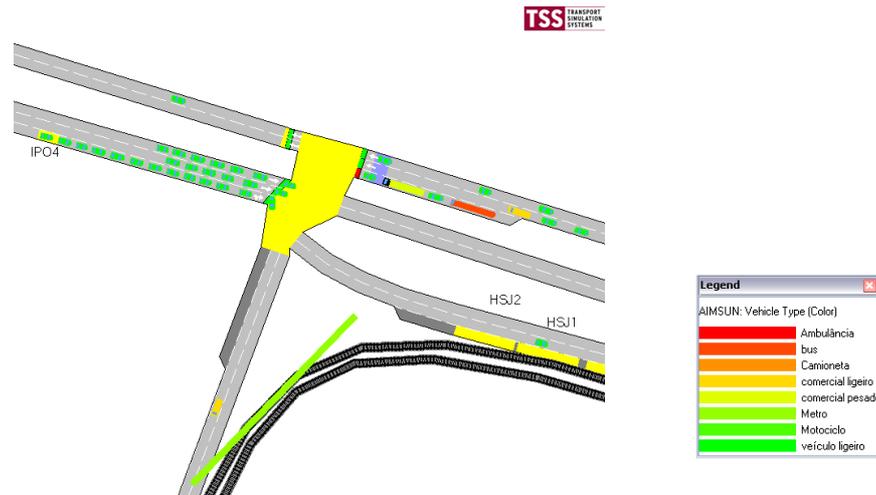


Fig. 4.2 – Representação gráfica do tipo de veículos

As classes são usadas para a definição de vias de uso exclusivo, podendo ser definidas várias classes (pública, privada ou outra qualquer criada pelo modelador). O uso de classes é opcional e apenas é usado para a definição de corredores exclusivos a um grupo de tipos de veículos.

#### 4.1.3. MODELOS COMPORTAMENTAIS DO VEÍCULO

Ao longo do seu movimento na rede, os veículos deslocam-se de acordo com os modelos que descrevem o comportamento dos diferentes condutores: a interação entre veículos (*car-following*), a mudança de via (*lane-changing*) e o intervalo crítico (*gap acceptance*) de modo a garantir que os veículos não colidem. Cada veículo procura viajar à sua velocidade máxima ao longo da secção mas o ambiente envolvente, os outros veículos e as regras de circulação condicionam o seu movimento. O modelo é actualizado de acordo com o intervalo de simulação, valor este definido pelo modelador, normalmente compreendido entre 0,1 a 1,0 segundos.

##### 4.1.3.1. Interação entre Veículos

Foi durante a década de 60 [2] que este modelo foi desenvolvido, sendo actualmente um dos mais utilizados pelos programas de simulação de tráfego. O modelo *Car-Following* descreve a interação longitudinal entre um par de veículos consecutivos que viajam na mesma via, designados por: líder (*leader*) e seguidor (*follower*). Um veículo é classificado como seguidor quando a sua circulação é condicionada pelo veículo que o antecede, uma vez que se o veículo seguidor viajasse à sua velocidade máxima colidiria com aquele. O modelo é normalmente dividido em três tipos de submodelos de acordo com a lógica utilizada.

- Modelo da distância segura (*safe distance model*) – baseado no pressuposto que os veículos respeitam a distância de segurança aos que os antecedem. Segundo a regra de Pipes [2] “Uma boa prática para seguir um outro veículo é permitir uma distância de segurança entre veículos no mínimo igual ao comprimento do veículo por cada 16,1 km/h de velocidade a que o veículo viaja.” Para a sua determinação são utilizadas fórmulas matemáticas simples, que exigem a noção de tempo de percepção, de decisão e de paragem. Resultados empíricos confirmam este modelo.

- Modelo de Resposta ao Estímulo (*Stimulus-response models*) – a resposta, pode ser acelerar ou desacelerar e é condicionada pela sensibilidade e pelo estímulo (diferença de velocidade entre o veículo que vai à frente e o que o segue). A sua aplicação mais usual é em tráfego de apenas uma via.
- Modelo do “Espaço” (*Psycho-spacing models*) – nos modelos anteriores era considerada a percepção de diferença de velocidades (estímulo) independente das distâncias entre os veículos. Neste sub modelo é tido em conta que os condutores têm limitações na percepção do estímulo, dependendo da distância entre veículos. Esta lógica serviu para desenvolver o modelo de mudança de via.

O modelo de interação entre veículos utilizado pelo AIMSUN é baseado no modelo da distância segura desenvolvido por Gipps [8]. Neste modelo os veículos são classificados como livres ou condicionados pelo veículo da frente. Se for condicionado, o veículo seguidor tenta ajustar a sua velocidade de modo a obter um distância segura em relação ao seu líder. Este modelo é constituído basicamente por duas componentes: a aceleração e a desaceleração. A primeira representa a intenção do veículo em aumentar a sua velocidade enquanto a segunda reproduz as limitações impostas pelo veículo antecedente.

#### 4.1.3.2. Mudança de via

A mudança de via é modelada como um processo de decisão. Existem três tipos de causas para a necessidade de mudança de via:

- **Mudança de via obrigatória:** acontece quando é imposta a saída do veículo da via onde circula porque:
  - a via vai terminar;
  - a via não permite o movimento desejado ou o tipo de veículo;
  - a via se encontra bloqueada por algum incidente;
- **Mudança de via sem restrições:** acontece quando um veículo muda de via apenas para melhorar a sua posição para poder viajar à velocidade máxima. No caso de existência de vias múltiplas o veículo irá optar por aquela que possui uma velocidade de circulação superior e que não termina em breve. No entanto, para realizar a manobra de mudança de via estará condicionado ao espaço existente entre veículos. Esta mudança pode ocorrer por diversos motivos:
  - Existência de filas de espera;
  - Paragens de autocarros;
  - Movimentos de viragem em vias partilhadas;
- **Mudança de via antecipada:** ocorre quando um veículo muda de via em antecipação a movimentos lentos na via. O processo de decisão é baseado na diferença entre a velocidade na via corrente e nas vias adjacentes.

Em cada momento de “actualização” do veículo é verificada se existe a necessidade deste mudar de via, de acordo com os motivos anteriormente descritos. Verifica-se igualmente se existe um intervalo entre os veículos na via de destino que permita a manobra com completa segurança. Esse intervalo será dependente da velocidade de viagem praticada pelos veículos e quanto maior a velocidade maior deverá ser o espaço entre veículos. A manobra terá um período de tempo finito durante o qual o veículo que está a executá-la poderá acelerar e/ou desacelerar de modo a criar um intervalo mais seguro. O veículo que será o futuro seguidor poderá reduzir a sua velocidade de modo a aumentar o

intervalo. O risco que os condutores estão dispostos a correr para executar a manobra depende da agressividade dos condutores (quanto maior a agressividade maior o risco aceite), do tipo de mudança de via e da situação.

O tempo dispendido para realizar a manobra afecta a fluidez do tráfego uma vez que o veículo irá ocupar momentaneamente duas vias. É permitido apenas uma mudança de via por intervalo de simulação.

#### 4.1.3.3. Intervalo Crítico

Este modelo caracteriza o comportamento do condutor, quando este tem a intenção de mudar de direcção ou de via e necessita de esperar até que encontre um intervalo entre veículos suficiente para que possa efectuar o movimento, sendo este tempo mínimo necessário designado como intervalo crítico. O modelo de intervalo crítico tem em conta a distância entre veículos para uma colisão hipotética, as suas velocidades e as suas acelerações.

Os parâmetros dos veículos que mais influenciam o comportamento deste modelo são:

- Aceleração: a capacidade do veículo acelerar influencia o tamanho do intervalo crítico necessário para a manobra ser executada em plena segurança;
- Intervalo crítico máximo: período de tempo a partir do qual o condutor começa a ficar impaciente por não encontrar um intervalo crítico de passagem. Quando o condutor se encontra à espera durante um tempo superior ao crítico, a margem de segurança (normalmente dois intervalos de simulação) é reduzida para metade (apenas um intervalo);
- Distância de visibilidade;

A velocidade máxima, a velocidade de viragem e o coeficiente de aceitação também afectam o modelo mas de um modo mais ligeiro.

#### 4.1.4. GESTÃO DE TRÁFEGO

AIMSUN possui a capacidade de realizar operações de gestão de tráfego com a utilização de “estratégias”. A “estratégia” é um conjunto de “políticas” que são aplicadas para resolver determinado problema, como por exemplo obras em determinado local, um acidente de viação ou outro evento que altera as condições de circulação. A “política” é um grupo de acções que são executadas em simultâneo e activadas mediante certas condições definidas pelo modelador, que modificam as condições de tráfego ou comportamento dos condutores. As acções consideradas pelo programa são:

- O encerramento de vias que pode ser em exclusivo para determinada classe de veículos;
- A alteração da velocidade de secção para determinada classe de veículo;
- A obrigatoriedade de viragem dependendo da origem ou do destino de determinado veículo,
- Alteração do centróide de destino para uma classe de veículos;
- Bloquear a circulação em determinada área, o que pode representar um incidente.

As acções podem activar uma mensagem num placar electrónico de uma estrada (VMS), apenas de carácter meramente informativo.

#### 4.1.5. MODELAÇÃO DE TRANSPORTE PÚBLICO

Os transportes públicos ao contrário dos outros veículos circulam com rotas definidas e segundo um horário, que determina a sua frequência. AIMSUN agrupa as linhas de transporte público em planos. Para cada linha pode ser definida a sua rota, as suas paragens, o tempo que permanece parado, o horário das suas partidas e a que tipo de veículo corresponde (autocarro, metropolitano, eléctrico).

Os veículos de transporte público param ao longo de pontos fixos da rede para recolher e deixar sair passageiros, sendo o tempo que permanecem parados definido por um valor médio e o respectivo desvio seguindo uma distribuição normal. No entanto quando um veículo se aproximar de uma paragem na qual já se encontra outro, este irá esperar que o anterior prossiga a sua viagem.

No AIMSUN é possível definir três tipos de paragens para transportes públicos:

- Normal, a paragem é efectuada numa via da estrada, bloqueando a passagem dos outros veículos;
- Baía, à margem da estrada existe uma via curta onde o veículo executa a paragem não interferindo com a circulação dos outros veículos. No entanto se à chegada de um autocarro a paragem já estiver ocupada e não houver espaço para outro veículo este irá ficar na estrada a bloquear o tráfego até que haja espaço suficiente na baía;
- Terminal, se a primeira paragem definida para a linha for deste tipo, este começará a sua viagem nessa paragem em vez de no início da secção, no caso de ser a última acabará nesta e não no fim da secção.

#### 4.1.6. SIMULAÇÃO

A informação da simulação é organizada em cenários, experiências e reproduções. O AIMSUN pode definir mais de um cenário e para cada um, pode ser criada mais do que uma experiência. As experiências são constituídas pelas reproduções e no caso de existirem mais do que uma pode ser criada uma média das reproduções.

Nos cenários é centralizada a informação que define a procura, as linhas de transportes públicos e o plano de controlo dos sinais luminosos, sendo definidos:

- Os resultados a recolher;
- As estratégias e as condições em uso.

Na experiência são definidos:

- A duração do período de “aquecimento” (*warm-up*);
- Definição das chegadas, tipo de intervalo de entrada de veículos na rede;
- Os valores das variáveis (por exemplo o tempo de reacção);
- As políticas a serem activadas;

Nas reproduções é apenas definido o número da semente aleatória.

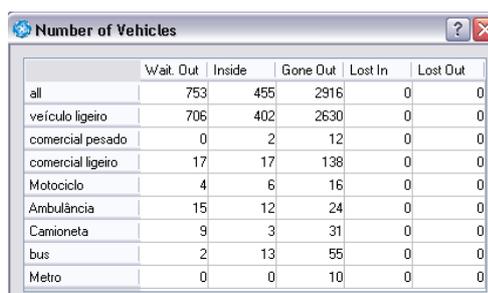
As simulações interactivas podem ser gravadas, executadas a diferentes velocidades e interrompidas a uma hora determinada. Existe também a possibilidade de simular sem animação, o que é feito com maior rapidez.

#### 4.1.7. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

O AIMSUN permite obter dados de saídas com os mais variados formatos passíveis de serem definidos pelo utilizador [8] podendo-se afirmar que o programa é valorizado pelas suas competências gráficas. Para além de um excelente grafismo que apoia a construção do modelo a mesma utilidade também se encontra presente na fase de exploração de resultados do modelo simulado. Durante a simulação, a duas ou a três dimensões, é possível criar vários tipos de animação de modo a realçar a informação que queremos analisar, por tipo de veículo, pelo movimento seguinte ou outra qualquer característica definida pelo modelador.

Os arcos, os detectores e os nós permitem retirar informação estatística distinta como por exemplo a densidade, a velocidade, o nível de serviço, o número de veículos, o tempo de viagem, o comprimento da fila de espera máxima e média entre outros, dependendo do elemento.

Durante a simulação é possível visualizar informação sobre o número de veículos em circulação de cada tipo, o número de veículos que esperam a sua entrada na rede, os que se encontram nela e os que já saíram (figura 4.3). A informação sobre o estado dos sinais luminosos também pode ser acompanhada ao longo da simulação através de uma caixa de diálogo.



	Wait. Out	Inside	Gone Out	Lost In	Lost Out
all	753	455	2916	0	0
veículo ligeiro	706	402	2630	0	0
comercial pesado	0	2	12	0	0
comercial ligeiro	17	17	138	0	0
Motociclo	4	6	16	0	0
Ambulância	15	12	24	0	0
Camioneta	9	3	31	0	0
bus	2	13	55	0	0
Metro	0	0	10	0	0

Fig. 4.3 – Exemplo de informação de resultados (número de veículos)

O modelador também pode obter informação detalhada sobre um determinado veículo durante a simulação através da sua selecção, sendo possível a visualização da evolução do seu percurso em tempo real (figura 4.4).

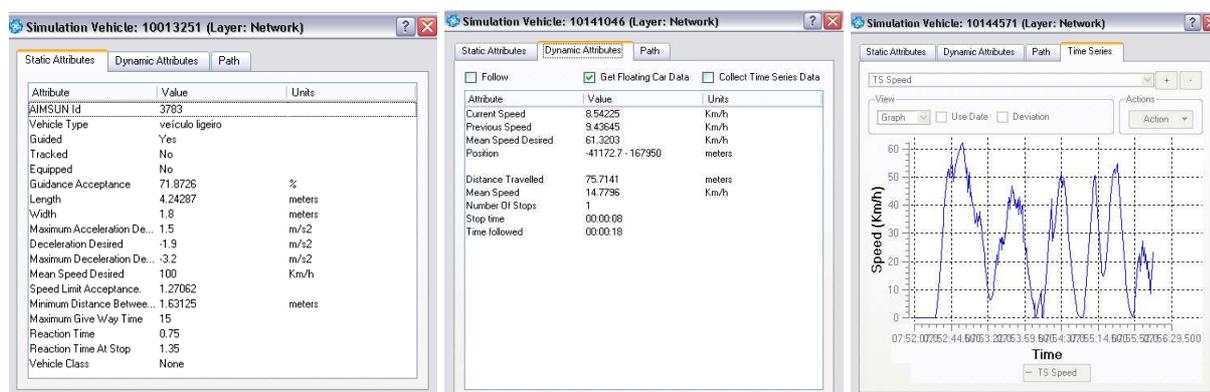


Fig. 4.4 – Exemplo dos resultados relativos à informação de um veículo.

Outra funcionalidade do programa é permitir a comparação de valores médios de conjuntos de iterações (experiências) através de gráficos, quadros ou tabelas de decisões. Com esses conjuntos podem ser executados testes de validação como o Coeficiente de *Theil*.

A comparação entre duas experiências pode ser entre duas simuladas ou entre uma simulada e a observada. O modelo tem a capacidade de ler os dados de detectores reais que devem ser utilizados para validar e calibrar o modelo para as condições de tráfego reais. O conjunto de dados reais, volumes e velocidades podem ser organizados por detector e por período de contagem, num ficheiro em formato *txt* ou numa base de dados.

As “estatísticas” relativas às variáveis de circulação da rede modelada podem ser gravadas numa base de dados com o formato de *Microsoft Access* ou *ODBC (Open Data Base Connectivity)*. Antes de iniciar a simulação é necessário seleccionar as variáveis para as análises que se pretendem efectuar, o modo de gravação, o sistema de unidades e o período de tempo de registo (global ou periódico).

O modelo AIMSUN permite ainda para cada tipo de veículo especificar os resultados em diferentes entidades: todo o sistema (A), um determinado arco (B), um movimento numa intersecção (C) ou um itinerário (conjunto de arcos contínuos) (D). No caso de se optar por este último apenas serão contabilizados para a “estatística” os veículos que realizem o percurso na totalidade. Se existirem linhas de transporte público (E) definidas podem ser obtidas estatísticas para cada uma delas. No quadro 4.1. apresenta-se um resumo das variáveis de tráfego que podem ser analisadas.

Quadro 4.1. – Resumo da base de dados de saída do AIMSUN com base em [8].

Resultado	Entidades				Definição (por entidade)
	A	B/C	D	E	
Volumes ( <i>veículos</i> )	X	X	X	X	Número de veículos que atravessaram a totalidade do elemento por hora.
Densidade	X	X			Número médio de veículos por quilómetro.
Velocidade Média ( <i>quilómetro/hora</i> )	X	X	X	X	Velocidade média para todos os veículos. Também medida a nível harmónico.
Tempo de Viagem ( <i>segundos</i> )	X	X	X	X	Tempo médio que um veículo demora a atravessar o elemento.
Atraso ( <i>segundos</i> )	X	X	X	X	Diferença entre o tempo de viagem expectável (condições ideais) e o gasto.
Tempo Parado ( <i>segundos</i> )	X	X	X	X	Tempo médio parado por veículo e quilómetro.
Número de Paragens	X	X	X	X	Número médio de paragens por veículo e quilómetro.
Total Viajado ( <i>quilómetro</i> )	X	X	X	X	Número total de quilómetros viajados por todos os veículos que atravessaram o elemento.
Tempo Total Viajado ( <i>segundos</i> )	X	X	X		Tempo total viajado por todos os veículos.

Resultado	Entidades				Definição (por entidade)
	A	B/C	D	E	
Combustível Consumido ( <i>litros</i> )	X	X	X		Total de litros de combustível consumidos pela totalidade dos veículos.
Poluição Emitida ( <i>quilogramas</i> )	X	X	X	X	Para cada poluente, o total de quilogramas emitidas por todos os veículos.
Fila de Espera Média ( <i>veículos</i> )		X			Fila de espera média na secção, expressa como número de veículos por via de secção.
Fila de Espera Máxima ( <i>veículos</i> )		X			Comprimento máximo da fila espera na secção, expressa por número de veículos e via.

## 4.2. INTRODUÇÃO AO CASO DE ESTUDO

Em qualquer estudo em que se aplique modelos de tráfego a primeira iniciativa a ser definida é a caracterização da zona a ser estudada, devendo ser esclarecidas não só todas as razões que tornam a análise necessária como também as questões para as quais se pretende que o modelo forneça respostas.

A selecção da zona urbana a ser modelada neste trabalho teve em atenção, por um lado, a concepção de um modelo representativo para se efectuar a análise pretendida neste trabalho, ou seja, o estudo da calibração em modelos de micro-simulação, e, por outro, o interesse prático que esta podia representar para a Câmara Municipal do Porto, onde decorreu parte do trabalho. Outro critério tido em consideração na definição da área foi o das suas dimensões, pretendendo-se que seja vasta o suficiente para permitir tirar conclusões que não sejam condicionadas por eventuais singularidades da rede modelada. No entanto, será de observar que à medida que a área aumenta também os recursos humanos envolvidos, o tempo necessário para a recolha de dados e o processamento da informação serão mais elevados.

## 4.3. IDENTIFICAÇÃO DA ZONA ALVO DE ESTUDO

A Asprela localiza-se no limite norte da cidade do Porto, na freguesia de Paranhos, ver figura no Anexo 3. Ao longo das últimas décadas a zona tem sofrido grandes alterações em termos de tipo de ocupação de solo e de densidade populacional, o que conduziu a sérios problemas de mobilidade e acessibilidade. A construção de grandes equipamentos públicos de ensino e também de uso privado atraíram milhares de pessoas que chegam diariamente por vários modos de transporte de várias partes do distrito.

Por outro lado, a construção de uma enorme quantidade de fogos levou a que esta se tornasse também uma importante origem de viagens. O Hospital de São João, inaugurado nesta zona em 1959, sendo um factor adicional para o congestionamento rodoviário, requer condições de tráfego muito diferentes das actualmente existentes. Por outro lado, a presença de grandes artérias como sejam a Estrada da Circunvalação (EN12), a Via de Cintura Interna (VCI) ou a Auto-estrada A3, com grande capacidade, implicam que seja possível um enorme afluxo de tráfego à zona. Trata-se, portanto, de uma área de grande interesse e complexidade.

Pretende-se que a modelação da zona represente uma importante ferramenta de apoio à gestão de tráfego na cidade do Porto. Uma vez modelada, será possível estudar cenários hipotéticos de modo a encontrar uma solução para o problema de congestionamento da área, cenários esses que não são objecto da presente dissertação. A má gestão de tráfego nesta zona além de ser um incómodo considerável, neste caso pode mesmo implicar perda directa de vidas, uma vez que se encontra aqui localizado um dos hospitais centrais da zona norte do país. É necessário que a ligação a este se faça da maneira mais simples e rápida. A correcta modelação da zona também permitirá inferir sobre o impacte na estrutura viária que a construção de mais equipamentos públicos (já previstos) pode causar, tornando possível a sua mitigação.

A complexidade é acrescida devido à confluência de diferentes meios de transporte: colectivo público viário urbano e interurbano, incluindo o metro de superfície, público individual, privado individual, de emergência, e seus respectivos terminais.

#### **4.4. DEFINIÇÃO DO SOFTWARE QUE MELHOR SE ADEQUA À ZONA E OBJECTIVOS DE ANÁLISE**

Nesta fase avalia-se e selecciona-se o software de simulação mais adequado ao caso de estudo. Os critérios básicos são as capacidades técnicas do *software* que passam por verificar se este é apropriado ao tamanho da zona e se tem sensibilidade às variáveis de estudo, as interfaces, qual a dificuldade em introduzir e editar os *inputs* e de que forma são apresentados os *outputs*. A nível do utilizador, existem outros critérios, que correspondem aos recursos a investir na aprendizagem do programa e à assistência provida pela entidade comercializadora.

O modelo escolhido para esta simulação foi o *software* AIMSUN, o que estava definido *a priori* para a dissertação aqui desenvolvida. Assim sendo, condicionou-se a zona escolhida às características do programa, invertendo-se a ordem usual nos estudos tradicionais de micro-simulação.

#### **4.5. RECOLHA DE DADOS PARA O MODELO DE MICRO-SIMULAÇÃO**

A recolha de dados fidedignos para a caracterização da rede em estudo constitui o objectivo primordial desta fase. A fidelidade do modelo vai depender directamente da qualidade dos dados recolhidos.

Para a realização do presente estudo, foi necessário proceder à recolha de dados ao longo de todas as etapas que se apresentam em seguida, pelo que são imprescindíveis constantes visitas ao local, que permitam ao modelador um perfeito conhecimento da zona. Porém antes de se proceder ao trabalho de campo é de grande importância identificar quais os dados necessários a recolher não só para a codificação como também para a avaliação da calibração.

O software AIMSUN tal como outros modelos de micro-simulação requer como dados de entrada relativos à oferta: a geometria da rede, os elementos de controlo, tipo de estradas e vias. Para definir a procura são necessários dados relativos à entrada de veículos na rede, as suas proporções de movimento, as linhas de transportes públicos e os tipos e classes de veículos.

##### **4.5.1. DADOS GEOMÉTRICOS**

A forma física de uma rede é alcançada através da caracterização da infra-estrutura de transporte que se pretende analisar, ou seja, pela introdução dos dados geométricos relativos às vias (arcos) e às intersecções (nós). Os primeiros dizem respeito à caracterização física das vias no que concerne ao seu “número”, à sua largura, ao seu comprimento, às vias reservadas, à velocidade de projecto, declives e

curvaturas dos segmentos. Nas intersecções interessam outros elementos, nomeadamente os ângulos da intersecção e os movimentos permitidos aos veículos.

Normalmente este tipo de informação é obtido através de desenhos em formato digital da zona em estudo (DWG/DXF ficheiros de AutoCAD ou ArcGIS, ficheiros de imagem JPEG ou bitmap) ou por fotos aéreas, que em caso de zonas com uma área de grande dimensão ou com muitos acidentes geográficos deverão ser corrigidas com recurso à orto-rectificação. As informações retiradas dos desenhos são posteriormente confirmadas com visitas de campo.

No presente estudo o suporte utilizado foi uma planta em formato AutoCAD datada de Dezembro de 2007 e os ortofotomapas de 2004 (folhas 19, 24 e 25), cedidos pela Câmara Municipal do Porto.

Deste modo foi possível definir a rede da zona da Asprela com duzentos e dois arcos perfazendo um total de 15 km de comprimento e sessenta nós, dos quais oito são regulados por sinais luminosos. O software AIMSUN considera cada sentido de uma estrada como um arco ou secção pelo que no caso desta possuir dois sentidos será necessário duplicar o arco. Todas as intersecções foram contabilizadas como nós mesmo quando algumas das ruas não foram modeladas devido à sua reduzida “representatividade”.

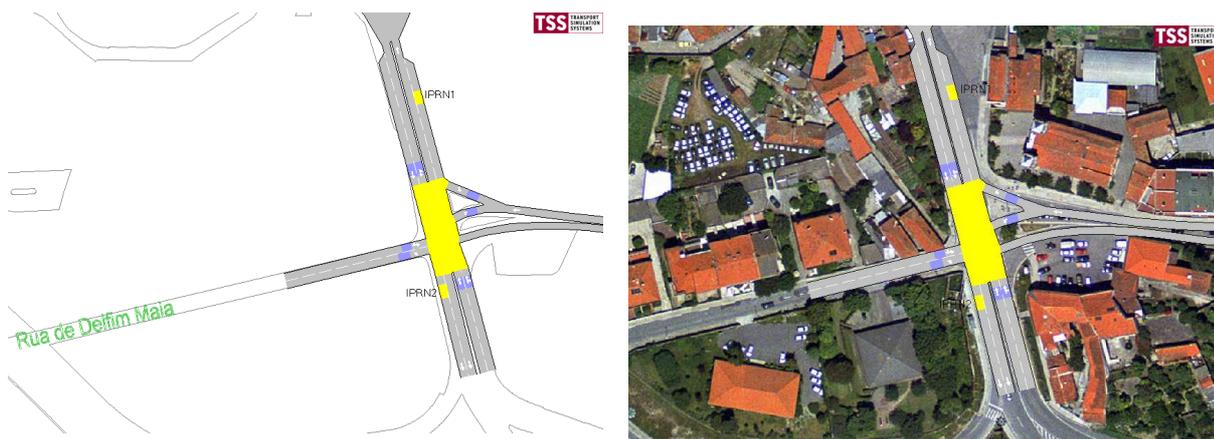


Fig. 4.5 – Nó de Paranhos, construção da rede com recurso a um ficheiro CAD e a um ortofotomapa.

#### 4.5.2. ELEMENTOS DE CONTROLO

Os elementos de controlo regulam a prioridade de passagem dos veículos num nó/intersecção sendo os mais usuais as regras de prioridade (intersecções prioritárias ou de prioridade à direita) e os sistemas de sinalização luminosa.

Cada conjunto de sinais luminosos numa intersecção obedece a um determinado ciclo, que está dividido em fases. Uma fase representa o tempo no qual pelo menos um grupo/corrente de tráfego tem a permissão de avançar. Na transição de uma fase para a outra existe um tempo de aviso para os condutores (amarelo) seguido por um tempo de limpeza (tudo vermelho), designado de tempo interverde. Todos os sinais luminosos abrangidos neste estudo têm tempos de aviso e de limpeza iguais a 3 segundos, perfazendo um total de 6 segundos.

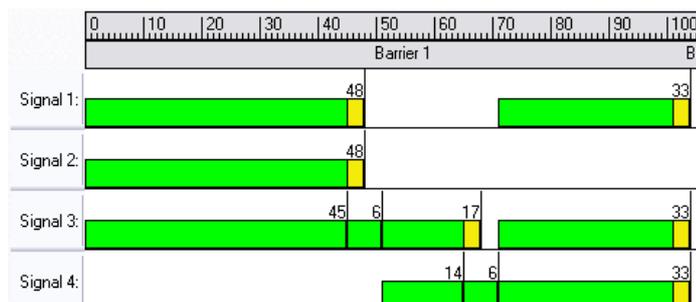


Fig 4.6. – Exemplo de ficha de programação da intersecção Circunvalação com Rua Dr. Bernardino de Almeida

Os parâmetros dos sinais luminosos foram fornecidos pela Câmara Municipal do Porto, através da cedência das folhas de programação. Os valores foram sujeitos a confirmação com a realização de visitas de campo aos cruzamentos com sinais luminosos. Nas contagens dos tempos de cada uma das fases e do ciclo, foram encontradas algumas incoerências com os valores presentes nas fichas de programação, as quais foram rectificadas.

Todos os sinais luminosos presentes na rede são do tipo actuado ou semi-actuado que podem ser programados no AIMSUN através da introdução da acção de micro-regulação variação do tempo de verde, através da definição dos valores para a extensão, para o tempo de verde máximo e mínimo de cada uma das fases, e da localização do detector que deverá regular cada uma das correntes de tráfego.

Os peões não foram contabilizados neste estudo, pelo que não foi possível introduzir a fase exclusiva de peões de um modo actuado, tendo sido considerado como um tempo fixo presente em todos os ciclos ou a cada dois ciclos.

Um caso particular de micro-regulação encontra-se no nó formado pela intersecção das ruas Dr. Plácido Costa e Dr. Manuel Bernardino em que além de ser regulado por um sinal luminoso actuado o mesmo tem presente um sistema de prioridade ao Metro de Superfície (caso denominado na bibliografia da especialidade de *pre-emption*). Quando o Metro passa na espira (detector) localizada a uma determinada distância da intersecção é activada uma outra fase que activa a prioridade de passagem ao metro. Deste modo o veículo prioritário não necessita de parar no nó seguindo a marcha sem interrupção.

Os sinais verticais possíveis de inserção na rede dizem apenas respeito a elementos de controlo de prioridade, o sinal STOP e o de Cedência de Passagem. Durante uma visita de campo foram identificados todos os sinais existentes e sua respectiva localização, seguindo-se a sua introdução na rede modelada. No entanto, estes não são suficientes para caracterizar a prioridade, uma vez que o software não reconhece o dever de cada veículo de ceder a passagem a todos os outros que se lhe apresentam pela direita, artigo presente no código da estrada [18]. Todas as intersecções da rede foram analisadas e inseridos os sinais verticais de modo a se poder representar a realidade da regra enunciada (observe-se que, ao contrário da realidade, é possível introduzir no modelo sinais Stop ou Cedência de Passagem que apenas afectem um movimento e não a totalidade da corrente de tráfego).

#### 4.5.3. TIPO E CLASSES DE VEÍCULOS

Os veículos são divididos em diferentes classes conforme as suas características físicas e operacionais. Para cada tipo de veículo, o utilizador pode definir onze variáveis, podendo ainda para cada parâmetro

distinguir quatro valores: o valor médio, o desvio, o valor mínimo e valor máximo, definindo estes valores uma distribuição normal.

Na área em estudo foram distinguidos o veículo ligeiro, o motociclo, a ambulância, o autocarro, o metro de superfície, o comercial ligeiro e pesado. As características adoptadas foram obtidas das referências [19], [20], [21], [22], uma vez que os valores por defeito não eram razoáveis. Especialmente nos casos da aceleração máxima e desaceleração normal e máxima os valores por defeito eram muito elevados, na ordem do dobro em relação aos apresentados na tabela, procedendo-se assim ao levantamento de valores em bibliografia da especialidade.

Quadro 4.2. – Valores médios das características dos veículos ([19], [20], [21], [22]).

	Veículo Ligeiro	Motociclo	Ambulância	Autocarro	Comercial Ligeiro	Comercial Pesado	Metro de Superfície
Comprimento ( <i>m</i> )	4,4	2,0	5,6	12,0	5,6	12,0	70,0
Largura ( <i>m</i> )	1,8	0,8	1,9	2,0	1,9	2,0	2,7
Aceleração Máxima ( $m/s^2$ )	2,2	3,1	2,2	1,4	2,2	1,6	1,6
Desaceleração Normal ( $m/s^2$ )	1,9	2,5	1,9	1,2	1,9	1,7	1,3
Desaceleração Máxima ( $m/s^2$ )	3,2	3,8	3,2	2,0	3,2	3,0	1,7
“Aceitação da Velocidade”	1,3	1,3	1,3	1,0	1,3	1,3	1,0
Distância Mínima entre veículos ( <i>m</i> )	1,7	0,8	1,7	1,5	1,7	1,5	-
Intervalo Crítico (s)	15,0	10,0	10,0	50,0	10,0	5,0	-

Cada tipo de veículo pode pertencer a nenhuma, uma ou até várias classes de veículos. Cada classe de veículos está associada a um determinado corredor reservado. No presente caso foram definidas três classes:

- Classe prioritária (ambulância) que está associado ao corredor existente em frente ao Hospital de São João;
- Classe pública (autocarro, ambulância) para os corredores bus;
- Classe metro para as vias ferroviárias.

#### 4.5.4. TIPO DE VIAS

Uma rede viária pode ser constituída por diferentes tipos de vias no que concerne às condições oferecidas para a circulação do tráfego (por exemplo vias rápidas ou arruamentos urbanos locais). Poderão também existir canais próprios para a circulação de transportes colectivos. Assim, no modelo em uso existem vários tipos predefinidos, caracterizados pela velocidade máxima permitida, capacidade e *gabarit* da via, entre outros parâmetros. A zona da Asprela possui apenas vias urbanas e a linha de metro.

Por outro lado, como já referido, as vias podem ser de uso generalizado ou reservadas para determinada classe de veículo (corredor exclusivo).

#### 4.5.5. LINHAS DE TRANSPORTE PÚBLICO

Os transportes públicos são simuláveis através da implementação das rotas de cada linha e respectivas paragens. Ao serem definidos os horários e tempos de paragem - que tanto podem ser representados por um valor médio como por um valor específico - para cada paragem numa determinada linha, o software reúne condições de gerar os veículos não sendo necessário proceder à sua quantificação *in situ*.

Devido à falta de informação de algumas empresas de transporte colectivo apenas os veículos da Sociedade de Transportes Colectivos do Porto (dezoito linhas diurnas e duas nocturnas) e do Metro do Porto (uma linha) foram gerados, sendo que a informação relativa a rotas, horários e localização das paragens foi retirada de [23] e [18]. O tempo de paragem do veículo metro foi fixado em trinta segundos nos terminos e de vinte segundos nas restantes (dados fornecidos pela empresa). Para os autocarros adoptou-se o valor médio de 12,29 segundos com um mínimo de 2,00 segundos e um máximo de 180 segundos de acordo com a referência bibliográfica [24]. A quantificação dos restantes veículos de transporte colectivo foi realizada durante a recolha de dados da procura.

#### 4.5.6. PROCURA

A codificação da procura de uma rede pode ser efectuada, como já referido, de duas maneiras distintas:

- Matriz Origem-Destino, a maneira mais usual de codificar que define quantitativamente as viagens realizadas num período de tempo, representando cada célula (i,j) da matriz o número de veículos que pretendem se deslocar da zona *i* para a zona *j*;
- Estados de tráfego (*traffic state*) que contem o número de veículos por hora em cada secção de entrada na rede e as proporções de movimentos numa intersecção no caso de existir mais do que um movimento permitido numa secção. Cada estado de tráfego é definido para um tipo de veículo em particular e um período de tempo definido.

A procura na zona da Asprela foi definida através dos estados de tráfego para períodos de tempo de quinze minutos na hora de ponta da manhã, entre as 7h45 e as 8h45, e para os seis tipos de veículos anteriormente referidos, perfazendo assim um total de trinta e dois estados de tráfego. Num ficheiro designado por procura de tráfego (*traffic demand*) reúne-se a totalidade dos estados de tráfego por ordem cronológica e tipo de veículo.

A procura existente na rede foi recolhida através do recurso a contagens manuais classificadas. A recolha decorreu em duas semanas consecutivas durante o mês de Março, de terça a quinta-feira, perfazendo um total de seis dias. Nos quatro primeiros dias procedeu-se à recolha de dados em dezoito intersecções, num total de oitenta e nove movimentos e nos dois dias subsequentes foram contabilizadas as entradas/saídas em quatro parques. Os restantes valores (dezassete parques) foram obtidos a partir de um estudo realizado em 2006 [25]. No anexo 1 – Contagens Direccionais de Tráfego, encontra-se descrita detalhadamente a metodologia utilizada e os dados das contagens, assim como todas as folhas de registo associadas, apresentando-se no quadro 4.3. um resumo dos valores apurados.

Quadro 4.3. – Resultados globais das contagens *in situ*

Período horário (hora)	Categoria de Veículos					
	V. Ligeiro	Motociclo	Ambulância	Autocarro	Comercial	
					Ligeiro	Pesado
7:45 – 8:00	4705	51	81	82	224	17
8:00 – 8:15	5444	22	111	71	281	10
8:15 – 8:30	5772	37	96	69	232	10
8:30 – 8:45	5940	28	84	41	259	16
Total	21861	138	372	263	996	53

Note-se que neste quadro cada veículo é contabilizado várias vezes (sempre que realiza um movimento).

#### 4.6. CODIFICAÇÃO DO MODELO

Terminada a recolha de informação segue-se a etapa da codificação da rede. O objectivo desta fase é transformar a informação que caracteriza a rede, recolhida anteriormente, num formato que seja passível de leitura pelo software de modelação.

A codificação em AIMSUN comparada com outros programas de simulação, como o SATURN, é realizada de um modo mais amigável, não sendo necessário construir folhas de cálculo automático auxiliar para facilitar a introdução dos dados.

A construção da geometria da rede é efectuada de uma forma gráfica e interactiva, através do “decalcar” de uma imagem da zona de estudo, não sendo necessário as coordenadas dos nós nem o início e final de cada arco. A cada elemento da rede está associado uma caixa de diálogo que facilmente pode ser activada e os parâmetros introduzidos.

#### 4.7. VERIFICAÇÃO

Antes da calibração da rede é necessário proceder à sua verificação. Pretende-se desta forma garantir que a informação introduzida pelo modelador foi correctamente tratada pelo programa, ou seja, que esta foi bem codificada.

De acordo com [20], os principais componentes do modelo de micro-simulação de tráfego que devem ser revistos são:

- A representação geométrica dos tipos de estradas e de todos os avisos relacionados com o tráfego, no caso em estudo apenas aplicável aos detectores e sinais luminosos;
- Os esquemas de representação do controlo de tráfego (fases, tempos, etc.) e de movimentos permitidos e proibidos;
- O comportamento individual dos veículos segundo os sub-modelos de comportamento: *car-following*, *lane changing* e *gap acceptance*;
- A representação da procura de tráfego, conseguida no presente trabalho através do número de veículos em cada secção de entrada na rede e as percentagens de movimento em cada intersecção.

Assim, cada um dos elementos referidos anteriormente foi cuidadosamente verificado tendo-se dedicado especial atenção os seguintes pontos:

- As ligações aos nós;
- Os movimentos permitidos nos nós;
- A programação dos sinais luminosos;
- A codificação da procura;
- Os movimentos prioritários e não prioritários, de modo a resolver todos os acidentes de viação que aparecem ao longo da simulação devido a movimentos conflituosos;

O processo de construção de uma rede no AIMSUN é assistido com mecanismos de verificação, que encontram os erros na geometria dentro dos limites de regras lógicas. Alguns aspectos como por exemplo os movimentos permitidos e os tempos dos sinais luminosos não são analisados pelo software uma vez que este não tem essa capacidade. Porém a não inclusão de um movimento previamente definido em nenhuma das fases é passível de ser identificado pelo assistente de revisão de erros.

O *software* tem várias formas de encontrar possíveis erros de codificação e todas foram usadas neste caso de estudo.

- a) Durante a construção, especialmente enquanto as caixas de diálogo se encontram a ser preenchidas estas só podem ser encerradas se a informação se encontrar segundo o padrão de lógica do programa.
- b) Uma função (*Tools* → *Check and Fix Network*) que localiza os erros e os apresenta sob a forma de um quadro, classificados (vermelho ou amarelo) e com uma breve explicação. A figura 4.7. diz respeito ao caso de estudo, onde foram encontrados arcos conectados a mais de dois nós, movimentos pouco ortodoxos e linhas de transportes públicos com percursos interrompidos.

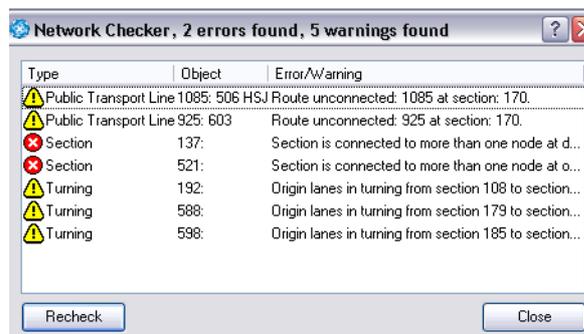


Fig. 4.7. – Exemplo de erros detectados pelo assistente do software na rede

A verificação de erros permitiu eliminar todo o tipo de erros fatais (vermelho) e mensagens de aviso (amarelo).

- c) No caso de a procura ser codificada por *traffic states* aquando da simulação surgem mensagens de aviso se a soma das percentagens dos movimentos for diferente de 100% e a identificação do arco em que isso acontece.
- d) Outra forma de rever a procura é através dos detectores presentes na rede. Estes detectores permitem obter sob a forma de gráfico ou tabela o número de veículos, o intervalo crítico, e a velocidade entre outras características para cada categoria de veículo num dado período de tempo. Os dados recolhidos nas contagens foram comparados com os obtidos durante a simulação pelos detectores presentes na rede.

Após a codificação e verificação da rede, o modelo encontra-se preparado para a última fase, a calibração/validação.

No Anexo 3 – Rede da Asprela codificada em AIMSUN, é possível visualizar a representação física da codificação. No quadro 4.4 encontra-se um resumo da quantidade de nós por tipo e o número de secções totais.

Quadro. 4.4. – Resumo de número de nós.

<b>Elemento</b>	<b>Número</b>
Nós Totais	61
Nós Semaforizados	8
Nós Prioritárias	7
Nós Fictícios	39
Secções Totais	202

No próximo capítulo será desenvolvida a etapa correspondente à calibração do modelo. A calibração é realizada em simultâneo com análises de sensibilidade de modo a encontrar a combinação de valores de variáveis com melhores resultados em termos de testes estatísticos e identificar as variáveis com maior influência nos resultados finais. Estudou-se a adequabilidade de cada parâmetro envolvido na análise de sensibilidade, de forma a poder discriminar entre aqueles que são relevantes para o caso em apreço e aqueles que não tem capacidade de exprimir os efeitos das alterações das variáveis.

# 5

## ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

### 5.1. APRESENTAÇÃO

O objectivo da análise de sensibilidade é compreender melhor o processo associado à fase de calibração de um modelo. O uso de um modelo microscópico de simulação em meio urbano exige uma extensa caracterização da procura e da oferta, necessitando de inúmeros recursos face à quantidade e diversidade de dados e inevitavelmente de simplificações de modo a tornar possível a sua representação. Deste modo torna-se fundamental compreender qual a influência de cada uma das variáveis intervenientes no modelo no seu resultado final.

No presente trabalho pretende-se usar a análise de sensibilidade durante o processo de calibração de um modelo, com o intuito de avaliar a resposta do mesmo a alterações estruturadas nas variáveis de entrada. O recurso a este tipo de técnicas permite o conhecimento relativo da importância de cada uma das variáveis, uma vez que os seus valores podem ser modificados (para cada variável, isoladamente e de forma tão precisa quanto pretendido) e os respectivos impactos nos resultados podem ser avaliados.

As vantagens associadas a esta metodologia são a identificação do grau de sensibilidade das variáveis e qual a amplitude de valores que os dados de entrada podem assumir de modo aos erros serem admissíveis. Este processo é uma ferramenta vital em qualquer projecto de simulação, sem ele o nível de confiança nos resultados do modelo é inferior.

É importante referir que as análises dos resultados obtidos e consequentes generalizações devem ser associadas ao meio de modelação, principalmente no que concerne:

- Tipo de modelo, uma vez que existem diversos modelos: estáticos ou dinâmicos, determinísticos ou estocásticos, macroscópicos ou microscópicos, analíticos ou de simulação. Mesmo que se trate de modelos do mesmo tipo, nem todos derivam das mesmas bases teóricas e pressupostos;
- Tipo de rede, nomeadamente a sua geometria (número de arcos), grau de saturação e sua estrutura;
- Comportamentos dos condutores, uma vez que este é bastante variável consoante o ambiente em que se encontram inseridos.

Por último, será de observar que as análises de sensibilidade realizadas neste trabalho foram executadas tomando em consideração apenas os parâmetros assumidos como mais relevantes.

## 5.2. METODOLOGIA

A análise de sensibilidade tem por base a existência prévia de um modelo construído e verificado. Assim, após a verificação da rede codificada, fixa-se que o modelo se encontra isento de erros e que é fisicamente representativo do sistema real, embora ainda não calibrado. Numa primeira instância a análise de sensibilidade foi feita em termos da proximidade dos resultados do modelo em relação aos valores observados, o que se pode considerar uma calibração. Posteriormente estudou-se o efeito da variação do valor das variáveis sobre os resultados finais, tomando como referência dois dos conjuntos de valores de variáveis obtidos na calibração. Seleccionaram-se propositadamente conjuntos com melhor aproximação à realidade observada, mas relativamente distintos a nível de valores das variáveis de forma a alargar o espectro de análise. Este último processo é, portanto, uma análise de sensibilidade num sentido mais estrito.

O método consistiu em escolher um conjunto de variáveis de entrada de acordo com o objectivo do estudo, alterar o valor de cada uma em particular de um modo estruturado e sistemático, criando-se diferentes cenários e respectivos conjuntos de dados de saída sendo possível avaliar o respectivo impacto nos resultados. Normalmente, os resultados avaliados são parâmetros (índices, parâmetros estatísticos, etc.) calculados em função dos volumes de tráfego, das velocidades e dos tempos de viagem. A comparação entre os dois sistemas real e virtual é realizada de acordo com a metodologia mais apropriada, descrita no capítulo 3.

A caracterização da procura resulta de observações reais. Face ao volume de informação necessário, as campanhas de recolha de dados são habitualmente realizadas em diferentes períodos pelo que quando se está a avaliar o desempenho do modelo estas circunstâncias devem estar sempre presentes.

Por último, a metodologia preconizada é bastante dependente do modelo de aplicação tanto a nível das variáveis necessárias à construção do mesmo como aos resultados das análises. Como o modelo microscópico AIMSUN é estocástico necessita de um determinado número de corridas com diferentes números de sementes aleatórias de modo aos resultados serem representativos. Referências bibliográficas sugerem que dez corridas são suficientes.

Em seguida é apresentado um excerto do artigo [11] onde foi realizada uma comparação entre os programas de simulação microscópicos e combinados VISSIM e CORSIM.

*“Dez (10) corridas são executadas para cada cenário e modelo. Uma vez que o VISSIM e o CORSIM são modelos estocásticos (aleatórios), existem pequenas diferenças dependentes do número da semente aleatória. Fez-se a média das múltiplas corridas de modo a responder a esta questão...”*

Pese esta informação, foi testada a diferença nos volumes de uma simulação com dez corridas e uma outra com o dobro de corridas e as diferenças ficaram abaixo de um ponto percentual, optando-se assim pelo valor inicial de dez corridas.

## 5.3. TIPOS DE ANÁLISES DE SENSIBILIDADE

A análise de sensibilidade pode ser realizada em três tipos de elementos distintos:

- Nas variáveis;
- Na geometria da rede;
- No controlo de tráfego (tipo de micro-regulação ou tempo das fases).

De acordo com a referência [12], independentemente do tipo de análise de sensibilidade, esta pode ser aplicada de duas maneiras distintas. A denominada análise tradicional consiste em alterar os valores de apenas uma variável em cada simulação, ao passo que para a segunda possibilidade a simulação da variação decorre simultaneamente em mais do que uma variável.

A análise tradicional permite identificar o grau de sensibilidade de cada uma das variáveis de aferição, através da análise da relação causa-efeito, no entanto não é possível conhecer a interacção entre as variáveis, uma vez que se altera cada variável isoladamente.

Este tipo de análise ao permitir isolar os efeitos das alterações nos valores das variáveis em função da resposta do modelo, possibilita identificar aquelas com maior relevância para o desempenho do modelo, que assim facilitará uma mais rápida convergência da calibração. Deste modo, também é possível determinar a amplitude de valores admissíveis das variáveis.

Por último, será de referir que esta técnica permite identificar quais as zonas mais sensíveis da rede, isto é, aquelas para as quais uma pequena alteração na variável gera grandes impactes na rede.

Como referido anteriormente, o segundo tipo de análise caracteriza-se por permitir a alteração simultânea de várias variáveis, de modo a analisar se existe interacção entre elas e qual o efeito no funcionamento do modelo. A alteração de diversas variáveis em simultâneo leva a que o erro global corresponda ao somatório dos erros associados a cada variável, resultando num valor inferior se estes se anularem ou superior caso tenham como resultado erros do mesmo sinal. A identificação destes fenómenos, porém, é uma tarefa difícil.

A realização deste tipo de análises pode acrescentar credibilidade ao modelo se os resultados obtidos estiverem de acordo com os resultados esperados.

Generalizando, a maior vantagem deste tipo análises será que em projectos futuros (relativos à área para a qual a análise foi realizada) se conhece *a priori* quais as variáveis a que o modelo em estudo é mais sensível e deste modo diminuir os recursos necessários para a fase de calibração.

#### **5.4. VARIÁVEIS ESTUDADAS**

A selecção das variáveis a testar deve ter em conta a funcionalidade do modelo, assim como de quais se possui pleno controlo.

Apesar de uma análise de sensibilidade comparativa entre os diversos modelos ser uma tarefa com extrema importância científica, esta revela-se incomportável devido aos enormes recursos envolvidos em tal trabalho, além de que o tema deste trabalho especifica que a análise de sensibilidade deve ser restringida à fase de calibração de um modelo urbano com recurso ao programa de modelação AIMSUN.

Os modelos microscópicos de simulação de tráfego possuem uma quantidade de resultados que descrevem as condições de circulação tais como o volume, a densidade, a velocidade, os tempo de viagem, o atraso, o tempo parado, etc., sendo os resultados destas variáveis modeladas normalmente comparados com os valores observados no sistema real. Porém, como facilmente se compreende, não é tarefa fácil medir a totalidade das variáveis no sistema real, não se procedendo assim à comparação universal das variáveis. Neste trabalho as variáveis recolhidas foram os volumes de tráfego e os tempos de percurso. Estas duas variáveis para além de serem de simples recolha, uma vez que não exigem equipamentos especiais, são as bases para a generalidade dos critérios de calibração de um modelo.

Como foi descrito no capítulo 3 existe uma grande variedade de variáveis de aferição para o funcionamento da rede. Neste trabalho foi abordada a alteração das variáveis mais referenciadas nos artigos de bibliográficos [10], [20] e [26] à exceção das variáveis que descrevem os modelos comportamentais dos condutores. Assim as variáveis escolhidas foram:

- Tempo de reacção;
- Tempo de reacção parado;
- Aceleração máxima do veículo ligeiro;
- Desaceleração normal do veículo ligeiro;
- Desaceleração máxima do veículo ligeiro;
- Velocidade máxima do veículo ligeiro;

Os valores das variáveis adoptados durante as análises de sensibilidade tiveram em conta a resposta do modelo durante a simulação, os valores habitualmente referenciados nos artigos da especialidade ([10], [20] e [26]) e o meio onde a rede da Asprela se insere.

As variáveis como a aceleração máxima, a desaceleração normal, a desaceleração máxima e velocidade foram apenas alterados nos veículos ligeiros, uma vez que este tipo de veículo representa 92% da totalidade dos veículos (quadro 5.1.).

Quadro 5.1. – Distribuição do número de veículos por categoria

	Categoria dos Veículos					
	Veículo Ligeiro	Motociclo	Ambulância	Autocarro	Comercial	
					Ligeiro	Pesado
Total	25640	175	503	348	1155	77
Percentagem	92%	1%	2%	1%	4%	0%

#### 5.4.1. TEMPO DE REACÇÃO (TR)

O tempo de reacção é uma variável global, ou seja, que influencia o comportamento de todos veículos em toda a rede e não apenas a nível de secção ou do tipo de veículo. É definido por um único valor constante ao longo de toda a simulação.

Este parâmetro traduz o tempo de reacção que um condutor em movimento demora a reagir à alteração de velocidade do veículo precedente. É usado no modelo do comportamento da interacção entre veículos (cf. 4.1.3.1).

O tempo de reacção pode ser definido de duas formas distintas:

- Fixo, o tempo é igual ao intervalo de simulação;
- Variável, o tempo de reacção é um múltiplo do intervalo de simulação, podendo ser definida uma probabilidade discreta para cada tipo de veículo.

Como foi referido no capítulo anterior, o intervalo de simulação representa o tempo entre cada actualização do modelo (interacção entre veículos e mudança de via). O manual do programa [8] sugere um valor entre 0,1 e 1,0 segundos. Por defeito, o tempo de reacção assume o valor igual ao intervalo de simulação: 0,75 segundos.

Contudo a alteração do intervalo de simulação não influencia somente o tempo de reacção mas também o modelo comportamental do intervalo crítico, uma vez que a distância de segurança numa

intersecção é igual a dois intervalos de simulação e apenas um quando o tempo de espera de entrada numa intersecção (*give way time*) é ultrapassado, conforme já referido no ponto 4.1.3.3.

A modelação será mais ou menos sensível consoante as actualizações, sendo o valor do intervalo crítico menor ou maior, respectivamente. Com intervalos de simulação menores os condutores tornam-se mais “habilidosos” são capazes de se aproximar mais do veículo seguinte, de encontrar intervalos entre veículos mais facilmente, de acelerar mais rapidamente, sendo que a maior oportunidade de entrada na rede se reflecte em capacidades de secções maiores.

Assim é de esperar que para os tempos de reacção menores os tempos de viagem sejam menores e os volumes totais na rede maiores, e vice-versa. Por outro lado, será de observar que quanto menor este intervalo de simulação maior será o grau de precisão na localização dos veículos, precisão esta que será tanto mais importante quanto maiores forem as velocidades praticadas na rede.

#### 5.4.2. TEMPO DE REACÇÃO PARADO (RTS)

Esta variável caracteriza o tempo que o veículo parado demora a reagir à alteração das condições de tráfego, como a mudança de fase num sinal luminoso ou a aceleração do veículo antecedente. O tempo de reacção parado pode também ser definido como um valor fixo ou então como um valor variável e múltiplo do tempo de reacção, não podendo ser inferior ao tempo de reacção.

Este parâmetro tem uma grande influência no comportamento das filas de espera e é o que possibilita um maior controlo sobre as mesmas.

#### 5.4.3. ACELERAÇÃO MÁXIMA (MA)

Todas as variáveis que caracterizam um tipo de veículo, como a aceleração máxima, são descritas através de quatro valores: a média, o desvio, o mínimo e o máximo.

A aceleração máxima, em  $m/s^2$ , corresponde ao valor de aceleração que o veículo pode atingir sob qualquer circunstância. É uma variável com grande importância nos modelos comportamentais como os de interacção entre veículos e de intervalo crítico. No primeiro modelo representa a intenção do veículo em conseguir uma determinada velocidade. No segundo, a decisão do veículo em avançar numa intersecção tem em conta a distância entre veículos para uma hipotética colisão, portanto a capacidade de aceleração máxima tem uma influência directa no intervalo de segurança exigido. Quanto maior a aceleração máxima menor o intervalo de segurança exigido e maior a rapidez em atingir a velocidade desejada, uma vez que tem uma maior capacidade de resposta. Assim os tempos de percurso esperados serão menores e os volumes de tráfego maiores.

#### 5.4.4. DESACELERAÇÃO NORMAL (ND)

A desaceleração normal, em  $m/s^2$ , é um parâmetro inerente a um tipo de veículo e que como tal é descrito pelos mesmos quatro valores que o anterior. Esta variável representa a desaceleração máxima em condições normais e é usada no modelo da interacção entre veículos formulado por Gipps (capítulo 3). Esta variável representa a limitação imposta pelo veículo seguinte, no modelo comportamental de interacção entre veículos. É de esperar que quanto maior a desaceleração normal menor o tempo de viagem e possibilita uma maior carga na rede que se poderá traduzir ou não num maior volume de tráfego.

#### 5.4.5. DESACELERAÇÃO MÁXIMA (MD)

Também é definida como uma variável que caracteriza um tipo de veículo. Esta variável é activada em circunstâncias de emergência, nos casos em que é exigida uma travagem brusca. Tal como a variável anterior é de esperar que valores maiores deste se traduzam em tempos de percursos menores e maior volume, no sentido anteriormente descrito.

De modo a simplificar o estudo, a alteração das variáveis previamente citadas tomaram um valor único para a média, para o máximo e para o mínimo, e valor nulo para o desvio. Esta simplificação permite retirar conclusões mais facilmente uma vez que se procede apenas a uma alteração por variável.

#### 5.4.6. VELOCIDADE

A velocidade, tal como as variáveis anteriores, caracteriza um tipo de veículo. Exprime a velocidade desejada por cada condutor independentemente das condicionantes de circulação de cada secção. Assim quanto maior a velocidade menores os tempos de viagem e maiores os volumes na rede.

Na figura 5.1 é apresentado o gráfico gerado devido à alteração da velocidade mínima e média.

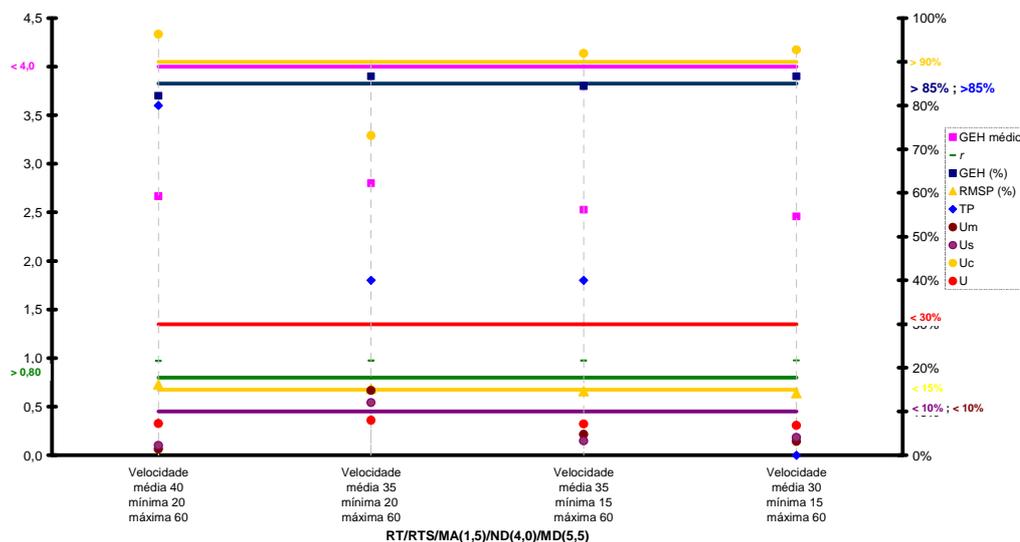


Figura 5.1. – Alteração da velocidade mínima e média

### 5.5. SELECÇÃO DOS PARÂMETROS DE AVALIAÇÃO

Como referido no ponto 5.2, os resultados de simulação mais usados como termo de comparação entre o modelado e o observado são os volumes de tráfego e o tempo de viagem. Estas duas variáveis macroscópicas foram escolhidas devido à relativa facilidade na sua recolha, sendo apresentados em anexo (1 e 2) os detalhes dos trabalhos de campo.

Os tempos de viagem foram definidos de acordo com três itinerários, sendo que na análise dois deles foram desdobrados por incluírem demasiados arcos ficando-se na totalidade com cinco percursos que cobrem de um modo generalizado toda a rede da Asprela (figura 5.2). Recorde-se que face aos recursos necessários para recolher esta informação as campanhas de recolha de dados dos volumes e dos tempos foram realizadas em meses diferentes, e que para cada resultado foi necessária uma sequência de dias respeitando sempre o horário: 7h45-8h45 e os dias úteis terça-feira a quinta-feira.

Um estudo referenciado em [12] admite que os tempos apresentam uma variação de  $\pm 10\%$  de dia para dia.

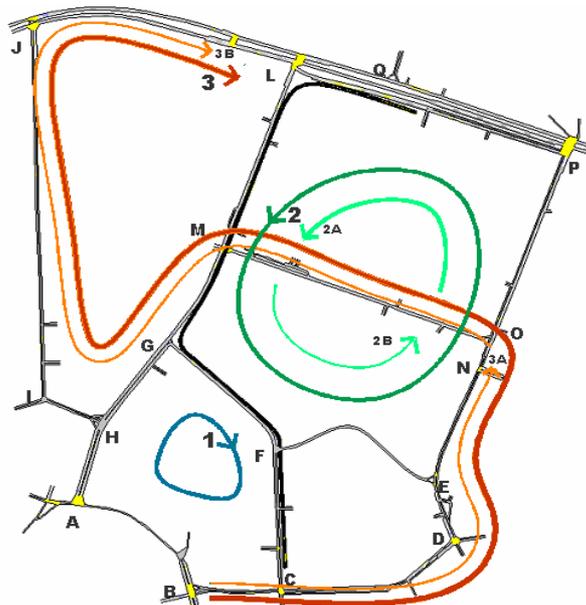


Fig. 5 2. – Percursos realizados

No que concerne aos diferentes parâmetros de avaliação utilizados na avaliação dos diferentes cenários recorreu-se aos descritos no Capítulo 3 do presente trabalho.

## 5.6. PROCEDIMENTOS

De um modo geral, este tipo de análise pressupõe a realização de quatro etapas por cada alteração de valor de uma variável. Primeiro escolhe-se a variável alvo de estudo, depois introduz-se a mudança do valor da variável na codificação do modelo, uma vez alterado segue-se a simulação composta por dez corridas, por fim os parâmetros definidos são calculados com base no valor médio retirado das dez corridas, tendo como referência os valores observados, e representados graficamente.



Fig 5.3. – Representação do processo da análise de sensibilidade

Uma vez que foram alteradas várias variáveis com intervalos de valores mais ou menos extensos foi necessário recorrer ao programa informático de cálculo *Microsoft Excel* de modo a conseguir uma sistematização. O modelo AIMSUN apresenta a funcionalidade de exportação dos resultados sob o formato de *Microsoft Access*, que são posteriormente transferidos para as folhas de cálculo onde ocorre o tratamento de dados e a respectiva representação gráfica.

## 5.7. TESTES DE ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

### 5.7.1. ENQUADRAMENTO

Nos pontos seguintes vão ser expostos os estudos de análise de sensibilidade executados, como a alteração das variáveis do modelo de um modo tradicional ou em simultâneo, o uso de intervalos com amplitude de valores a nível de unidades ou às décimas/centésimas (dependendo do cenário em estudo) e o recurso aos valores observados ou aos valores referentes a um cenário simulado base como termo de comparação.

### 5.7.2. ANÁLISE 1

As primeiras análises de sensibilidade realizadas consistiram na introdução de alteração dos valores da variável tempo de reacção (RT) entre 0,1 e 1,0 segundos, com intervalos decimais seguida da variação do tempo de reacção parado (RTS) (0.2, 0.6, 1.4 e 2.0 segundos), conforme se apresenta no quadro 5.2.

Quadro 5.2. – Tempos de percursos, em segundos, de acordo com a alteração de variáveis

Percurso	Obs	RT 0.1	RT 0.2	RT 0.3	RT 0.4	RT 0.5	RT 0.6	RT 0.7	RT 0.8	RT 0.9	RT 1.0
1	212	219	198	220	290	294	322	271	385	408	346
2	606	436	414	416	420	449	454	521	568	660	651
3	513	500	484	471	475	498	498	541	595	619	619

Percurso	Obs	RT 0.2					RT 0.6					RT 1.0		
		RTS 0.2	RTS 0.6	RTS 1.0	RTS 1.35	RTS 2.0	RTS 0.6	RTS 1.0	RTS 1.35	RTS 1.70	RTS 2.0	RTS 1.0	RTS 1.35	RTS 2.0
1	212	186	185	206	198	392	238	256	322	357	512	420	346	510
2	606	348	360	369	414	480	394	406	454	446	498	514	651	549
2A	285	226	236	244	255	312	248	258	266	286	311	301	329	326
2B	321	122	124	125	159	168	146	148	188	160	187	213	322	223
3	513	411	440	438	483	645	445	461	498	549	681	580	619	695
3A	210	121	124	129	158	274	138	147	176	215	284	198	190	273
3B	303	290	316	308	324	370	306	313	321	335	396	381	428	421

De acordo com o quadro 5.2, conclui-se que os percursos 3A e 2B (figura 5.3) não estão a ser adequadamente modelados uma vez que o tempo simulado só se aproxima do tempo observado quando os tempos para os restantes percursos já se haviam afastado da realidade. De modo a compreender a fonte de erro analisou-se o itinerário, assim como o tempo despendido em cada secção em ambos os percursos.

Analisando o percurso 2B, conclui-se que na secção não prioritária EF se encontra o maior erro, uma vez que o tempo modelado ficava sempre muito aquém do observado. No modelo comportamental do intervalo crítico a variável com mais peso é o intervalo de simulação, que neste caso é igual ao tempo de reacção. Contudo esta variável já havia sido alterada dentro do intervalo razoável. Sendo assim e após uma análise gráfica da simulação nesta intersecção, optou-se por alterar a sinalização da intersecção de movimento com cedência de passagem para o sinal vertical STOP. Esta opção foi tomada tendo em conta que o sinal vertical de cedência de passagem não representava adequadamente a realidade. Nesta intersecção em particular a reduzida visibilidade e a necessidade de cruzamento de uma via “obriga” os veículos a pararem a sua marcha antes de executar essa manobra. Também foi analisado a outra secção (FC) não prioritária, localizada no percurso 1 e conclui-se o mesmo que para a anterior, ou seja, o tempo modelado era inferior ao observado. Porém a discrepância entre os valores não era tão elevada devido ao inferior grau de congestionamento. Os sinais verticais foram igualmente alterados.

No percurso 3A, a análise do seu itinerário juntamente com os tempos dispendidos em cada secção constituinte permitiu concluir que a secção CD, DE e EN têm tempos modelados inferiores aos reais. Neste caso o problema não reside na prioridade, uma vez que todas as secções citadas são prioritárias. A dificuldade de simular adequadamente deve-se ao facto das secções DE e EN possuírem estacionamento lateral e o seu preenchimento ocorrer durante o período horário de simulação provocando atrasos na circulação dos veículos nestas secções, no sistema real. Como consequência do movimento lento dos veículos, os veículos da secção CD que maioritariamente (85%) desejam virar à esquerda encontram dificuldade de escoamento gerando-se uma fila de espera.

No entanto, a rede modelada não contempla o processo de estacionamento, por ausência de funcionalidade no programa de simulação utilizado, ao contrário de muitos outros modelos microscópicos de simulação de tráfego tais como o CORSIM, o VISSIM ou o PARAMICS.

Genericamente qualquer rede urbana aberta ao tráfego a veículos motorizados possui em determinadas zonas estacionamento na via pública, por isso seria de esperar que um modelo como o AIMSUN, que é preparado para redes urbanas, tivesse a capacidade de modelar este aspecto. A única solução encontrada para resolver este problema seria alterar a velocidade das secções afectadas de 50 km/h (limite imposto pelo código da estrada referência [18]) para um valor inferior na ordem dos 20 a 30 km/h. Contudo esta solução foi considerada como uma tentativa “forçada” de obter os valores pretendidos, não tendo sido adoptada. É expectável que nas próximas análises de sensibilidade, o percurso 3A, devido especialmente às secções referidas anteriormente, continue a apresentar valores para os tempos de viagem não satisfatórios.

### 5.7.3. ANÁLISE 2

Nesta segunda fase de análise de sensibilidade as secções FE e FC, como referido anteriormente, em vez de possuírem um sinal vertical de cedência de passagem, como acontece na rede real, apresentam um sinal de STOP. Paradoxalmente, desta forma acaba-se por simular melhor o comportamento real, pelas razões já descritas (fraca visibilidade e necessidade de atravessamento da via).

As variáveis alteradas nesta etapa foram o tempo de reacção, o tempo de reacção parado, a aceleração máxima, a desaceleração normal e a máxima, como esquematicamente apresentado na figura seguinte.



Fig. 5.4. – Variáveis alteradas na análise de sensibilidade

A alteração dos valores das variáveis foi realizada de acordo com os critérios descritos no ponto 4 deste mesmo capítulo. No quadro 5.3 apresenta-se os valores adoptados para as variáveis.

Quadro 5.3. – Valores adoptados para as variáveis

Tempo de Reacção (s)	Tempo de Reacção Parado (s)	Aceleração Máxima ( $m/s^2$ )	Desaceleração Normal ( $m/s^2$ )	Desaceleração Máxima ( $m/s^2$ )
0,2	0,6	1,5	2,0	3,0
0,4	1,0	2,0	3,0	5,5
0,6	1,35	3,0	4,0	8,0

A presente análise de sensibilidade que envolveu a alteração de cinco variáveis assumindo cada um três valores distintos originou um total de 293 casos cujos resultados (volumes e tempos de percursos) são de tal forma extensos, que apenas se apresentará a análise sob a forma de gráficos.

De modo a facilitar os inúmeros cálculos a realizar foram elaboradas, como já foi referido, folhas de cálculo específicas. Após a obtenção dos ficheiros com os resultados, estes foram usados para o cálculo de parâmetros de avaliação.

Os parâmetros de calibração escolhidos para realizar a avaliação dos resultados, foram seleccionados do capítulo 3. Para o caso dos volumes, os parâmetros foram agrupados por categorias, tais como:

- a) **Parâmetros estatísticos**, permitem inferir sobre o grau de relacionamentos entre os valores dos volumes modelados e observados:
  - $r$  – coeficiente de correlação amostral;
  - **Estatística U**, ou, **coeficiente de Theil** e seus derivados o  $U_M$ , o  $U_S$  e o  $U_C$ .
- b) **Parâmetros relativos**, contabilizam a diferença entre os volumes reais e os observados de um modo normalizado, de forma a remover o efeito de escala:
  - **RMSP** – desvio do erro médio quadrático em percentagem.
- c) **Parâmetros mistos**, incorporam tantos os erros em modo absoluto como em relativo:
  - $\overline{GEH}$  – Valor médio do parâmetro de GEH;
  - **GEH %** – percentagem das secções que possuem valor de GEH inferior a 5.

Para avaliar o tempo dispendido na viagem utilizou-se o único parâmetro presente no Capítulo 3 que limita a diferença relativa entre os tempos observados e modelados a 15% ou 1 minuto, em 85% dos casos. O parâmetro foi aplicado aos cinco percursos da seguinte forma:

$$TP_x = \frac{t_{real_x} - t_{mod\ elado_x}}{t_{real_x}} < 15\% \begin{cases} se\ verdadeiro & 1 \\ se\ falso & 0 \end{cases} \quad (5.1.)$$

Com:

$TP_x$  - Resultado do teste lógico para o percurso  $x$ ;

$t_{real_x}$  - Tempo observado para o percurso  $x$ ;

$t_{mod\ elado_x}$  - Tempo modelado para o percurso  $x$ .

$$TP(\%) = \frac{\sum TP_x}{N} \quad (5.2.)$$

Com:

$TP(\%)$  - Número de percursos, em percentagem, que cumprem o teste lógico (equação 5.2)

$N$  - Número de percursos.

Na figura seguinte apresenta-se o gráfico tipo que permite uma mais fácil interpretação dos vários gráficos que serão apresentados ao longo desta análise, identificando-se os parâmetros e os respectivos critérios a cumprir.

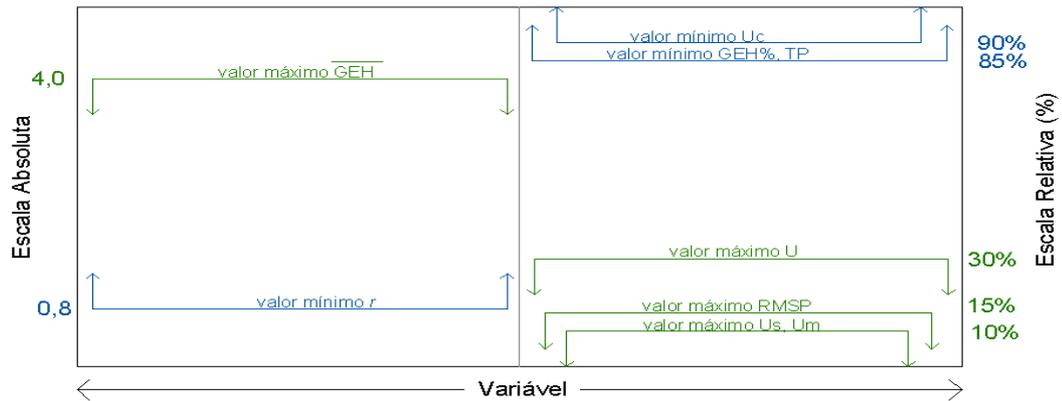


Fig. 5.5. – Gráfico tipo para interpretação dos resultados, adoptado de [12]

O gráfico tipo possui dois eixos de ordenadas: um relativo (direita) e um outro absoluto (esquerda). O eixo absoluto representa o  $\overline{GEH}$  e o  $r$ , e o eixo relativo o  $GEH\%$ , o  $RMSP$  e o coeficiente de *Theil* ( $U$ ,  $U_M$ ,  $U_S$ ,  $U_C$ ), este último apesar de não ser usualmente definido em percentagem mas sim em escala decimal, optou-se pela primeira de modo a facilitar a representação. No eixo das abcissas é caracterizada a evolução da variável da esquerda para a direita. Deste modo é possível visualizar a evolução do impacto da alteração dos valores das variáveis nos parâmetros seleccionados e se estes se encontram dentro dos valores admissíveis. Os valores admissíveis dos parâmetros estão fixados através de rectas paralelas ao eixo das abcissas com a respectiva seta de modo a representar se o valor é mínimo ou máximo e a cor do respectivo parâmetro de modo a facilitar a interpretação.

Na figura 5.6 encontram-se representados os sete parâmetros que variam em função dos valores das variáveis adoptadas, como foi referido anteriormente as variáveis alteradas foram: o tempo de reacção, o tempo de reacção parado, a máxima aceleração, a desaceleração normal e a máxima.

É importante referir que não foi possível incluir no eixo das abcissas o nome dos 293 casos.

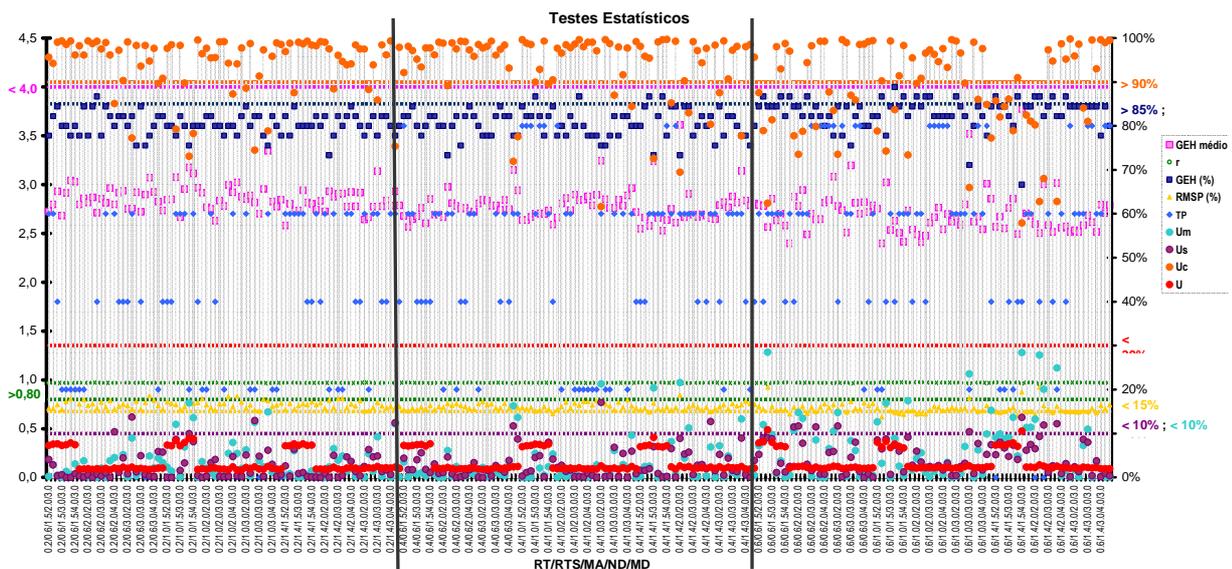


Fig. 5.6 – Representação gráfica da análise 2

Neste gráfico o eixo das abcissas está ordenado pelo tempo de reacção (0,2, 0,4, 0,6 segundos), de modo a facilitar a análise do comportamento do modelo provocado pela alteração do valor da variável.

Globalmente, o número de itinerários que cumprem o critério do tempo de percurso (*TP*) é maior para o tempo de reacção de 0,6 segundos. No entanto, o critério nunca é cumprido devido ao percurso 3A, resultado da impossibilidade do AIMSUN em modelar o fenómeno do estacionamento.

Analisando o parâmetro *GEH*, conclui-se que à medida que o tempo de reacção vai aumentado o  $\overline{GEH}$  adopta valores mais baixos e o *GEH%* assume valores maiores, sendo na zona de 0,6 segundos que se encontram quase a totalidade dos casos  $GEH\% > 85\%$ .

O *RMSP* tem um comportamento semelhante ao  $\overline{GEH}$ , com o aumento do tempo de reacção o valor global do parâmetro diminui. Realce-se que o maior número de casos que respeitam o critério ( $RMSP < 15\%$ ) encontra-se no intervalo do tempo de reacção igual a 0,6 segundos.

O coeficiente de correlação (*r*) apesar de ser um parâmetro bastante referenciado na bibliografia da especialidade não apresenta grande variação ao longo dos 293 casos analisados, assumindo valores na ordem dos 0,97 cumprindo sempre o respectivo critério ( $r > 0,8$ ). Deste modo é apenas possível concluir que todos os casos estudados do ponto de vista do coeficiente de correlação são satisfatórios não sendo possível retirar conclusões sobre a sensibilidade às variáveis estudadas em função deste parâmetro assim como a gama de valores que melhor se adequam.

O coeficiente de *Theil* e seus componentes, também cumprem sempre os critérios definidos.

Na figura 5.7 encontra-se representado o mesmo caso, agora ordenado pelo tempo de reacção parado (0,6, 1,0 e 1,4 segundos) de modo a facilitar interpretação da influência desta variável no desempenho do modelo.

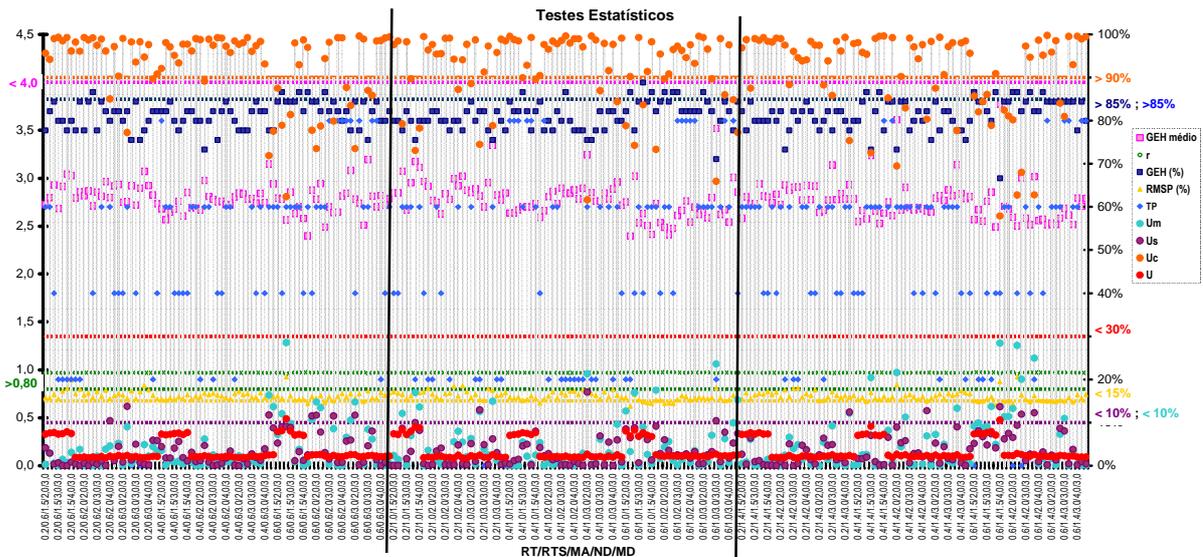


Fig 5.7. – Gráfico da análise 2 ordenado pelo tempo de reacção parado

Este gráfico não apresenta uma tendência tão marcada como o anterior. Os parâmetros  $\overline{GEH}$ , o GEH% e o TP cumprem os critérios independentemente do tempo de reacção parado a que correspondem. No entanto, se for feita uma comparação entre o comportamento dos parâmetros para os três valores da variável conclui-se que existem mais “bons casos” para um tempo de reacção parado igual à unidade. Quanto aos restantes parâmetros não foi detectada nenhuma tendência.

No gráfico que se segue o eixo das abcissas foi ordenado de modo decrescente da aceleração máxima ( $1.5, 2.0$  e  $3.0 \text{ m/s}^2$ ).

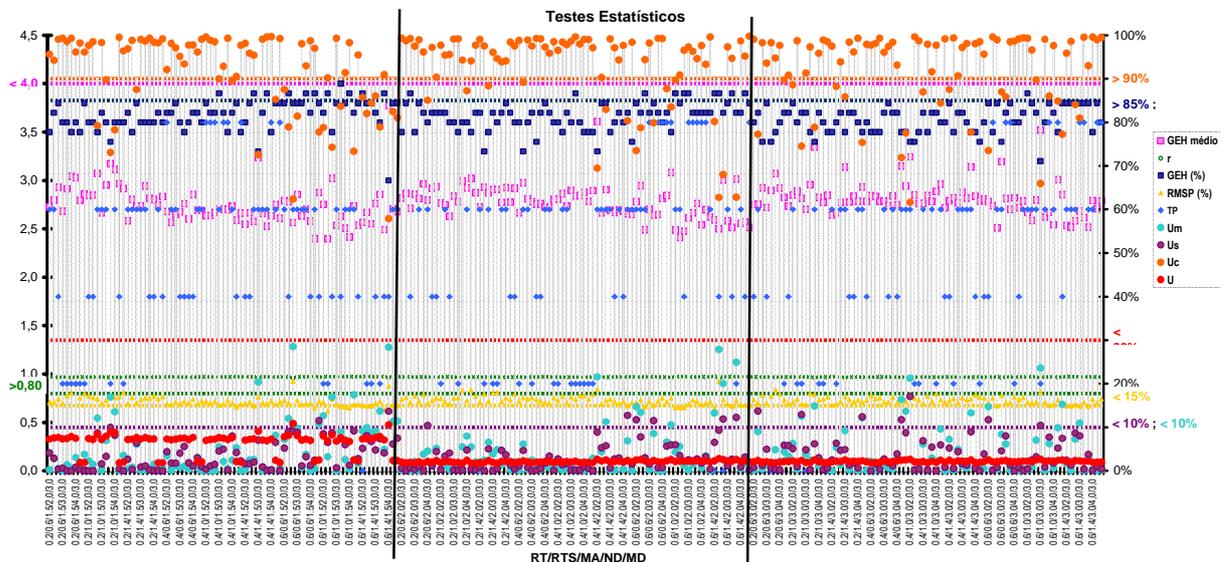
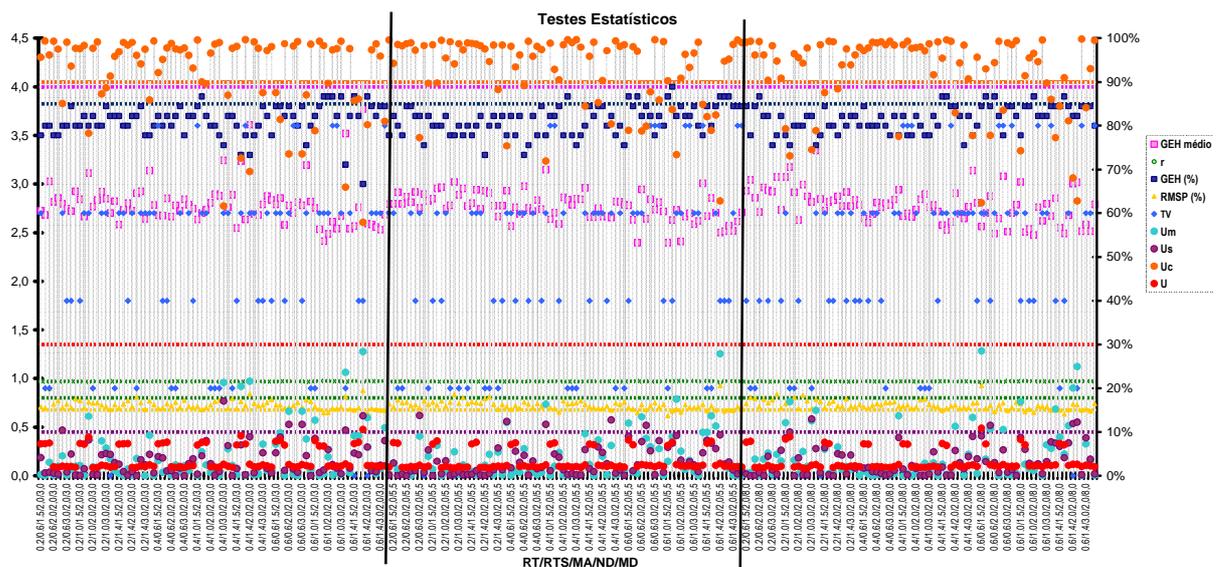


Fig 5.8. – Gráfico da análise 2 ordenado pela aceleração máxima

Os volumes de tráfego e os tempos de percurso apresentam resultados mais próximos dos observados para o valor de aceleração máxima menor ( $1.5 \text{ m/s}^2$ ). Para os valores maiores de aceleração máxima os parâmetros são muito semelhantes. O coeficiente de Theil apresenta grande dependência da aceleração assumindo valores na ordem dos 10% para o primeiro valor da variável e de 2% para os restantes.





5.10. – Gráfico da análise 2 ordenado pela desaceleração máxima

Por análise do gráfico é possível concluir que a variável não apresenta nenhuma influência evidente no desempenho do modelo, nem a nível de volumes de tráfego nem de tempos de percursos. Independentemente do valor assumido pela variável a representação gráfica possui a mesma configuração.

A realização deste segundo estudo permite concluir que de todas as variáveis testadas o tempo de reacção é a de maior influência no comportamento do modelo. A aceleração máxima tem menor impacto na rede, seguido do tempo de reacção parado e a desaceleração normal. O modelo não tem sensibilidade à desaceleração máxima para os valores adoptados.

Quanto aos parâmetros utilizados na análise deste caso de estudo é possível concluir:

- Coeficiente de correlação não é um bom indicador uma vez que para os diversos valores das variáveis apenas se registaram alterações a nível das centésimas. O critério foi sempre cumprido;
- RMSP apesar de também não apresentar grandes flutuações, o critério nem sempre foi cumprido;
- Coeficiente de *Theil* e seus derivados, aplicados globalmente ao modelo, não permitem retirar conclusões;
- GEH, absoluto e relativo, foi o melhor indicador de volumes utilizado;
- Tempo de percurso é um parâmetro bastante importante para o conhecimento do desempenho do modelo uma vez que é o único que tem em conta os tempos de viagem. No entanto, a existência de informação para apenas cinco itinerários leva a que o parâmetro seja muito discreto (intervalos de 20%) dificultando o cumprimento do critério.

É de referir que não houve nenhuma conjugação de variáveis capaz de cumprir os nove critérios dos parâmetros. Os melhores resultados de GEH%, de um modo global, não aconteceram para os mesmos valores de variáveis que correspondem aos melhores TP, facto talvez explicável pela execução de recolha de dados de volumes e de tempos de percurso ter acontecido em meses distintos.

## 5.7.4. ANÁLISE 3

Na sequência do segundo estudo (análise 2), onde foi testado a variação de cinco variáveis em que cada uma podia assumir três valores discretos, foi possível conhecer a conjugação de valores de variáveis que resultavam nos melhores valores para os parâmetros. Assim neste estudo optou-se por escolher dois dos melhores casos, mas com valores distintos para as variáveis. Os valores dos casos escolhidos podem ser consultados no quadro 5.4.

Quadro 5.4 – Casos escolhidos

Caso	Tempo de reacção (s)	Tempo de reacção parado (s)	Aceleração Máxima ( $m/s^2$ )	Desaceleração Normal ( $m/s^2$ )	Desaceleração Máxima ( $m/s^2$ )
1	0,60	1,00	2,00	3,00	3,00
2	0,40	1,00	1,50	3,00	5,50

No quadro 5.5 é possível consultar os parâmetros de cada um dos casos de estudo escolhidos.

Quadro 5.5 – Parâmetros dos casos escolhidos

Caso	GEH	GEH%	RMS	TP
1	84,4%	2,63	15,60%	80%
2	82,0%	2,70	15,29%	80%

Neste estudo a alteração das variáveis vai ser realizado de modo tradicional, cada variável vai ser alterada mantendo as restantes constantes.

## 5.7.4.1. Análise Refinada

A primeira análise realizada consiste em alterar as variáveis, presentes na figura 5.11, dentro de intervalos mais refinados.

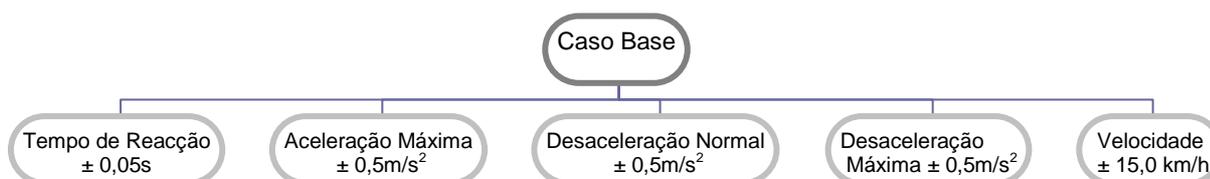


Fig. 5.11. – Variáveis estudadas

Com esta análise pretende-se conhecer o grau de sensibilidade do modelo face à alteração das variáveis de modo mais fino.

Os parâmetros utilizados nesta análise foram os mesmos que na anterior com a excepção do coeficiente de *Theil* e seus derivados que como não permitia retirar conclusões de um modo global deixou de ser representado. De modo a colmatar a falta de parâmetros que avaliem o tempo de percurso optou-se por incorporar na representação gráfica o tempo de cada percurso em minutos.

Para analisar os resultados obtidos optou-se pela comparação dos gráficos de cada caso de estudo que traduzem o desempenho do modelo, para cada variável. É importante referir que os intervalos de valores a variar para cada variável foram distintos consoante o caso de estudo.

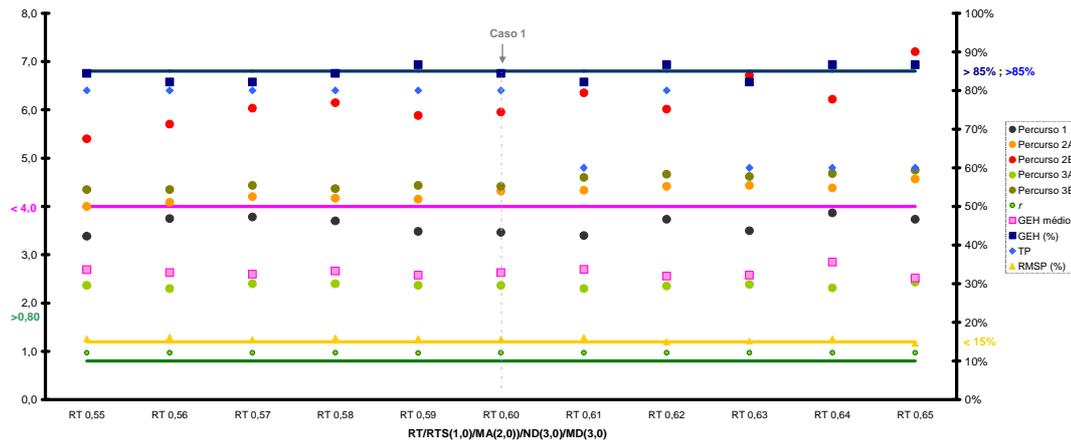


Fig. 5.12 – Tempo de reacção Caso 1

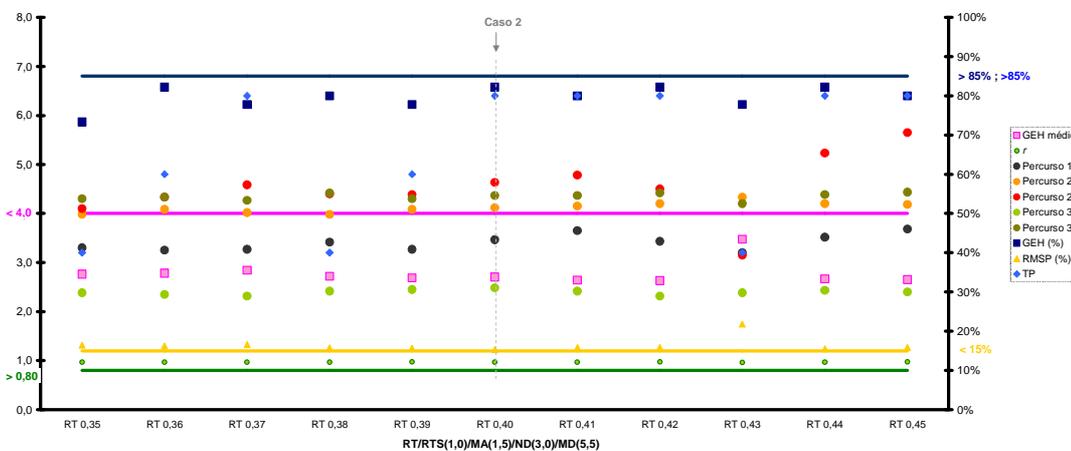


Fig. 5.13. – Tempo de reacção Caso 2

A variação do tempo de reacção às centésimas de segundo não apresenta grandes flutuações de volumes nem nenhuma tendência a nível dos tempos de percurso. Assim, verificou-se que os volumes não são significativamente influenciados pela alteração do tempo de reacção.

Os tempos de percurso apresentam-se como resultados mais sensíveis à alteração da variável tempo de reacção, o parâmetro TP possui valores mais satisfatórios no intervalo [0.35s;0.65s]. A flutuação do tempo de percurso não ocorre de igual modo para todos os percursos. No percurso 2A a oscilação é quase de 180 segundos, num percurso em que o tempo observado é de 321 segundos, e ocorre maioritariamente entre o intervalo [0.44s;0.58s]. É importante referir que os dois percursos com maior impacto na alteração do tempo de reacção possuem ambos uma secção não prioritária, ocorrendo a maior influência na secção com maior tráfego (1 e 2A).

Se os dois gráficos fossem colocados lado a lado seria notória uma continuidade nos tempos o que permite concluir que é uma variável com grande responsabilidade no desempenho na circulação dos veículos, principalmente a nível de tempos de viagem. Para valores de tempo de reacção próximos, os tempos de percurso são semelhantes, mesmo quando existe alguma diferença nas restantes variáveis.

Como foi referido anteriormente, a aplicação global do coeficiente de *Theil* e os seus componentes não permitiam retirar conclusões sobre o desempenho do modelo. Para o caso de estudo 1, as componentes do coeficiente de *Theil* foram calculados não em termos gerais mas para cada um dos detectores existentes, e representados na rede como pode ser consultado em Anexo 4 - Coeficiente de *Theil*. Os volumes utilizados corresponderam a intervalos de 15 em 15 minutos para tempo de reacção de: 0.55,

0.60 e 0.65 segundos. A análise dos resultados (cf capítulo3) permitiu a identificação de três *bottleneck*, entre a secção 165-175, a 155-301 e a 155-302.

O primeiro não pode ser considerado uma vez que se encontra numa zona que os volumes não estão correctamente atribuídos devido às incompatibilidades encontradas na recolha de dados, não permitindo uma análise válida. O segundo e terceiro localizam-se na mesma zona e devem-se à passagem de volumes observados de sobre para subdimensionados em determinado intervalo. Quanto a análise que permite inferir sobre a variabilidade dos valores observados/simulados constata-se que esta acontece nas secções congestionadas (155, 160, 237, 401 e 811) podendo dever-se aos veículos deslocarem-se muito próximos, esta situação também foi detectada nas secções (162, 177, 214, 327, 485, 744 e 747) que realmente possuem uma inconstância na procura no sistema real. Esta análise exige grandes recursos tendo sido assim optado pela execução apenas para o caso 1 e para a variável tempo de reacção.

Nas figuras 5.14 e 5.15 apresentam-se os resultados obtidos para uma variação da aceleração máxima entre 1.5 e 2.5 m/s<sup>2</sup> e entre 1,0 e 2,0 m/s<sup>2</sup>, tendo-se observado uma não coincidência nos valores dos parâmetros calculados, o que permitirá concluir que a variável em estudo não é dominante para o desempenho do modelo. No entanto, a sua contribuição é notória uma vez que os parâmetros vão-se alterando de acordo com a variação da aceleração máxima na ordem dos 180 segundos.

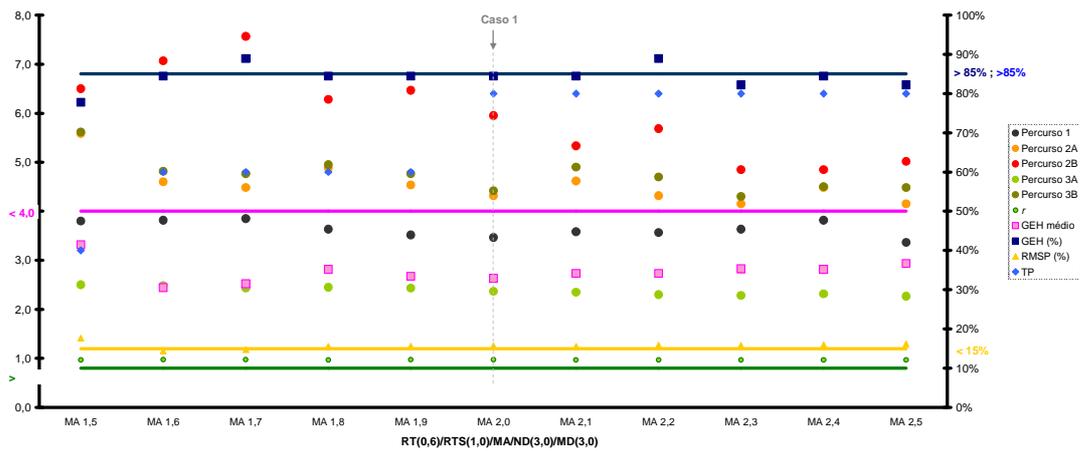


Fig. 5.14. – Aceleração máxima Caso 1

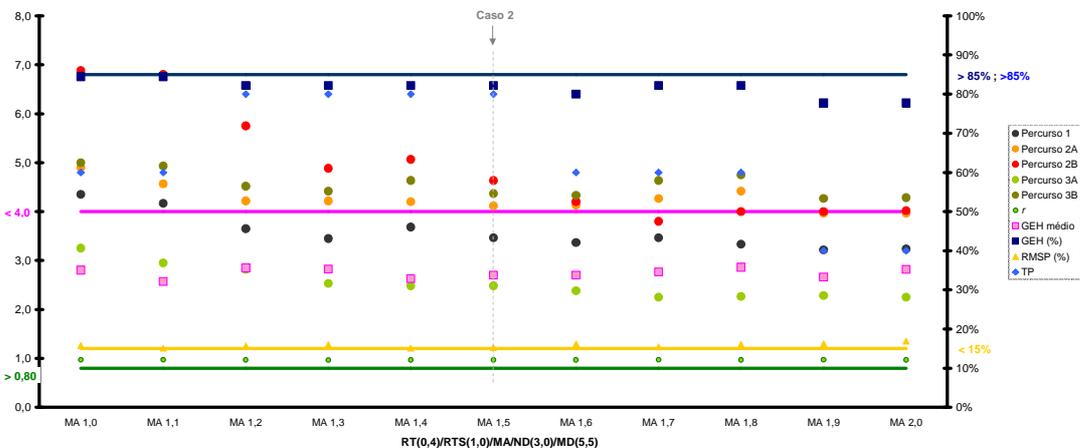


Fig. 5.15 – Aceleração máxima Caso 2.

Tal como tinha acontecido na variável anterior, os parâmetros correspondentes aos volumes não apresentam uma alteração significativa ao longo do eixo das abcissas. Como era esperado os tempos de viagem vão diminuindo com o aumento da máxima aceleração. O percurso 2B é mais uma vez o percurso com maior amplitude de oscilação. Para acelerações máximas inferiores a  $1,7\text{m/s}^2$  o modelo tem um comportamento muito atípico.

De acordo com as figuras 5.16. e 5.17. que reflectem os resultados obtidos em função da variação da desaceleração normal observa-se que os volumes permanecem constantes, com destaque para o  $\overline{GEH}$  que tem um comportamento inalterável tal como os parâmetros  $r$  e o RMSP.

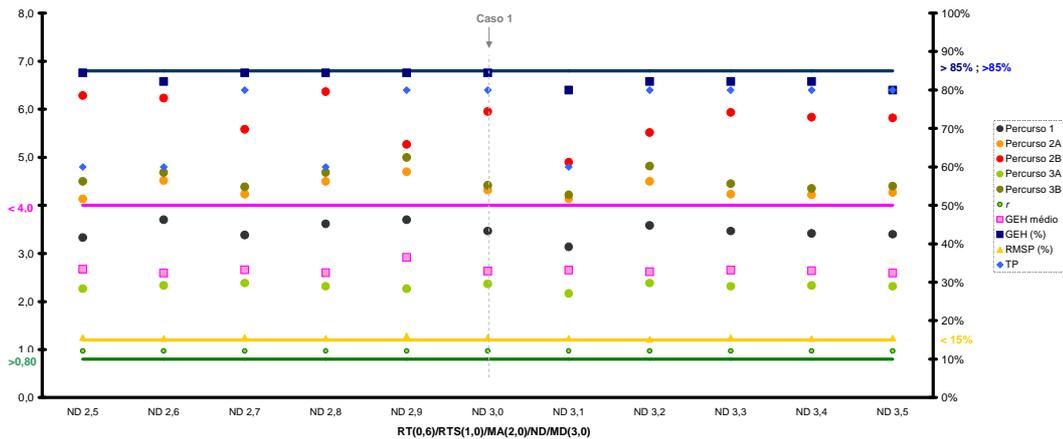


Fig. 5.16. – Desaceleração normal Caso 1

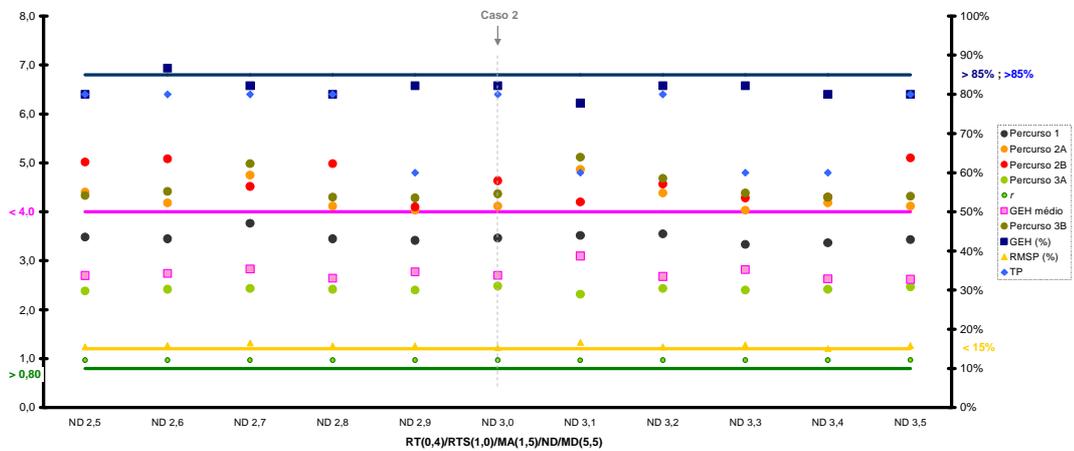


Fig. 5.17. – Desaceleração normal Caso 2

A desaceleração normal é a mesma em ambos os casos, pelo que o intervalo de variação também é igual. No entanto, isto não implica que os resultados (em termos dos gráficos 5.16 e 5.17) sejam semelhantes. Pode assim concluir-se que a desaceleração normal não é a variável com maior influência no comportamento do modelo. No entanto as oscilações verificadas são semelhantes em ambos os gráficos. Inesperadamente, os tempos não possuem qualquer tendência ao longo do eixo das abcissas, oscilando ora para valores superiores ora para valores inferiores.

Nas figuras 5.18 e 5.19, em que se apresentam os resultados em função da variação da desaceleração máxima entre 2.5 e 3.5 m/s<sup>2</sup>, no caso 1, e entre 5.0 e 6.0 m/s<sup>2</sup>, no caso 2, os volumes mais uma vez não apresentam qualquer alteração significativa.

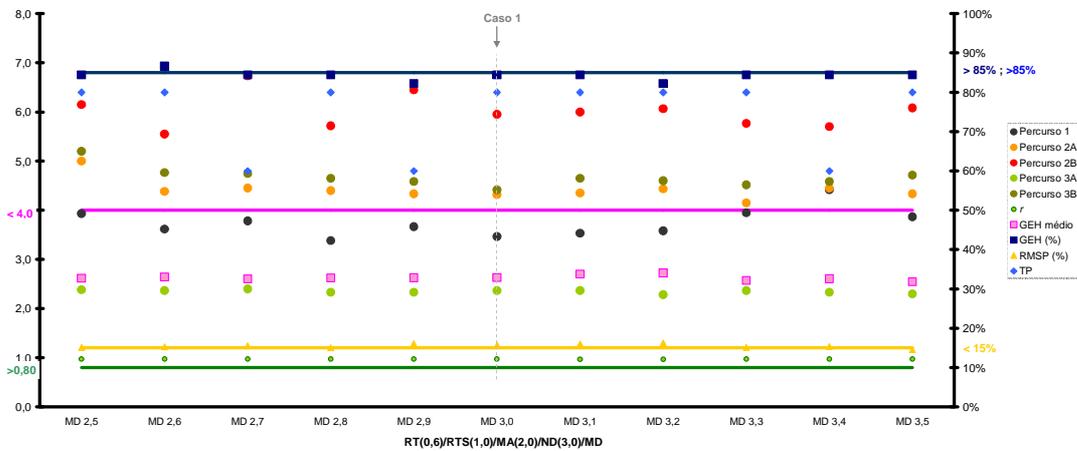


Fig. 5.18. – Desaceleração máxima Caso 1

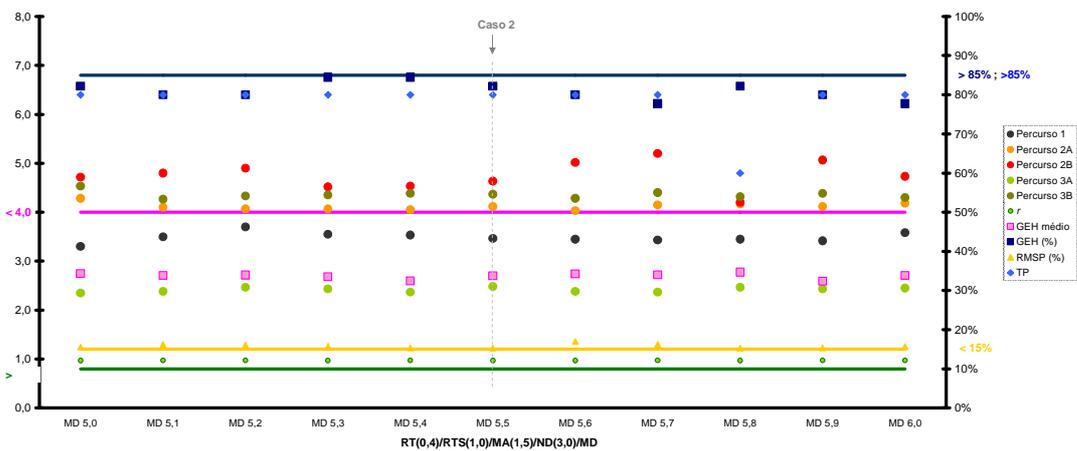


Fig. 5.19. – Desaceleração máxima Caso 2

No que se refere aos tempos de percurso, estes sofrem alterações inferiores às outras variáveis estudadas, inclusive o itinerário 2B que tem apresentado sucessivamente oscilações na ordem dos 180 segundos, na variável presente ficou abaixo dos 60 segundos. O parâmetro TP permanece mais constante (80%). Observe-se que os fenômenos atrás descritos são mais notórios no caso de estudo 2.

Por último, realizou-se uma análise em função da velocidade média, cujos resultados se apresentam nas figuras 5.20 e 5.21.

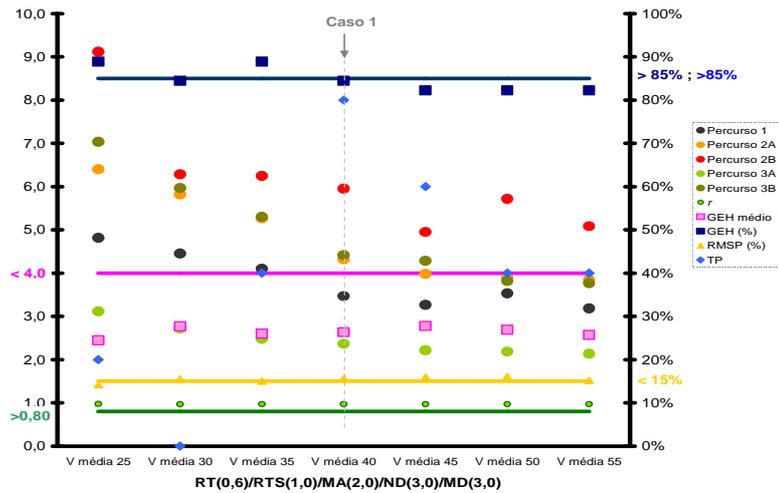


Fig. 5.20. – Velocidade Caso 1

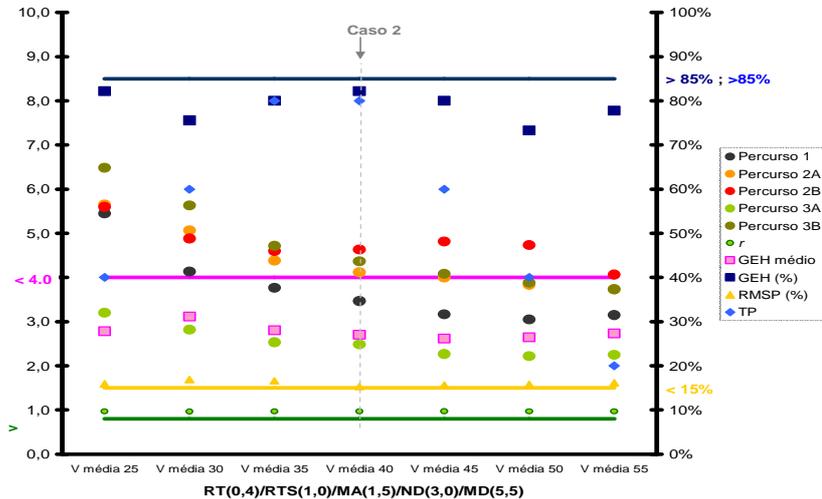


Fig. 5.21. – Velocidade Caso 2

O impacto sobre os tempos de percurso da alteração da velocidade média entre 25-55km/h é notório, com óbvio destaque para o percurso 2B. A tendência é óbvia, quanto maior a velocidade média menor o tempo de percurso, como seria de esperar. Os parâmetros baseados nos volumes continuam com resultados constantes.

Para velocidades médias de 50km/h ou próximas desta, o modelo apresenta um comportamento atípico, podendo esta situação resultar do facto de todos os arcos que constituem a rede terem sido definidos com velocidades máximas de 50km/h.

É possível concluir que o desempenho do modelo é condicionado pela velocidade média escolhida para os veículos, sendo sensível a alterações de 5km/h.

### 5.7.4.2. Análise Discreta

Este segundo teste designado de análise discreta apenas foi realizado para o caso 1 e consistiu em alterar as variáveis, que não tinham demonstrado grande relevância na análise anterior (figura 5.22), de um modo mais descontínuo.

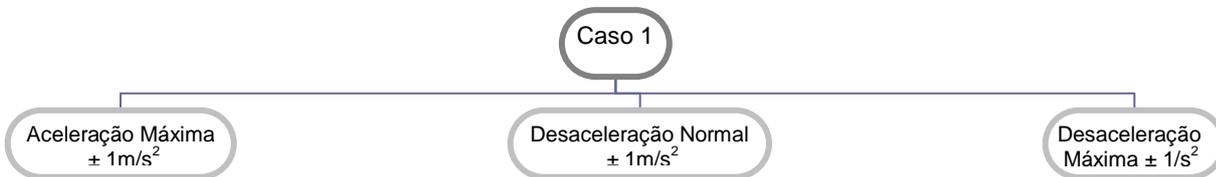


Fig. 5.22 – Variáveis alteradas na análise discreta

O objectivo desta análise é compreender se a fraca influência registada nos resultados na análise anterior se deveu ao facto de os valores escolhidos para as variáveis terem pouco impacto e serem muito próximos ou se a própria variável não tem grande impacte.

Para esta análise foi abandonado o coeficiente de correlação uma vez que este parâmetro apresentava pouca sensibilidade em todos os estudos, cumprindo sempre o critério estabelecido. Os parâmetros  $\overline{GEH}$ , o GEH%, o RMSP e o TP continuam a ser utilizados uma vez que permitem retirar conclusões sobre o desempenho do modelo.

Em complementaridade com os parâmetros escolhidos do Capítulo 3 foram acrescentados mais dois, de modo a colmatar a falha presente em todos os anteriores. Em nenhum dos parâmetros enunciados se considera no cálculo a sob ou sobrestimativa dos volumes/tempos em relação aos observados. De modo a solucionar esta questão foram acrescentados dois parâmetros retirados de [12]:

“resultam simplesmente na constituição de parâmetros que tenham em conta isoladamente as diferenças relativas positivas e negativas de forma a não se anularem... Estes dois novos parâmetros, apelidados de Erro Médio Relativo Positivo (EMRP) e Erro Médio Relativo Negativo (EMRN), são definidos por:”

$$EMRP = \frac{\sum_k \Delta q}{\sum_k q_{o_k}} \text{ com } \begin{cases} \Delta q = q_{m_k} - q_{o_k} & \text{se } q_{m_k} - q_{o_k} \geq 0 \\ \Delta q = 0 & \text{se } q_{m_k} - q_{o_k} < 0 \end{cases} \quad (5.3)$$

$$EMRN = \frac{\sum_k \Delta q}{\sum_k q_{o_k}} \text{ com } \begin{cases} \Delta q = q_{m_k} - q_{o_k} & \text{se } q_{m_k} - q_{o_k} < 0 \\ \Delta q = 0 & \text{se } q_{m_k} - q_{o_k} \geq 0 \end{cases} \quad (5.4)$$

Com:

$q_{o_k}$  - Volume/ Tempo observado na secção k;

$q_{m_k}$  - Volume/Tempo modelado na secção k.

A introdução de novos parâmetros na escala relativa (direita) obrigou a que esta fosse mais precisa alterando-se o máximo de 100% para 85%.

Na figura 5.23, na 5.24 e na 5.25 representam-se graficamente os resultados da alteração discreta das variáveis. Para uma análise mais consistente propõe-se a comparação dos resultados com o caso base simulado (1).

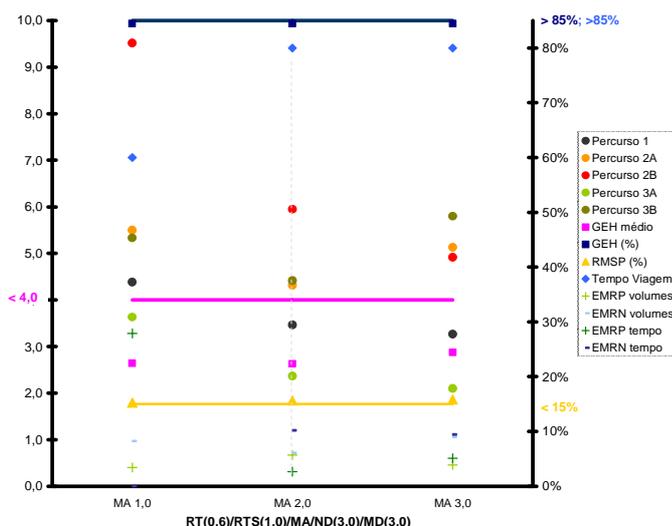


Fig. 5.23. – Aceleração Máxima Caso 1, análise discreta

A figura 5.23 vem confirmar que a passagem do valor da aceleração máxima de 2,0 m/s<sup>2</sup> para 1,0 m/s<sup>2</sup> aumenta desproporcionadamente os tempos de percurso, o parâmetro  $EMRP_{tempo}$  passa a ser superior ao  $EMRN_{tempo}$ . Tal como na análise anterior, os parâmetros dos volumes não apresentam quase alteração ao longo do eixo das abcissas, nem mesmo o erro médio relativo. Pode-se assim concluir que a variável em estudo tem impacte nos tempos de viagem mas não nos volumes.

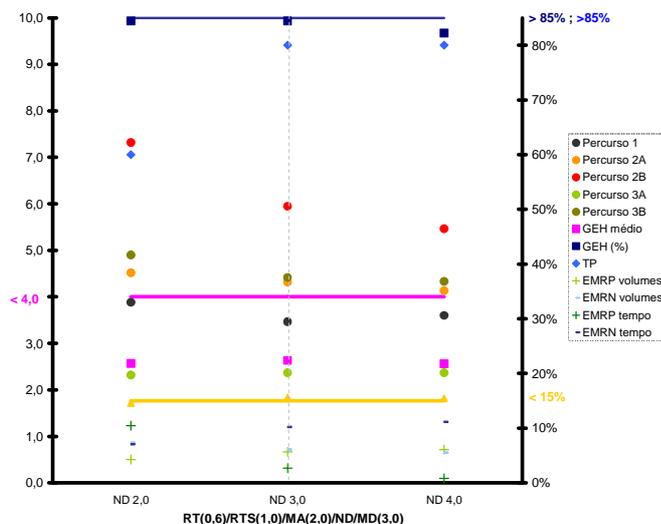


Fig. 5.24. – Desaceleração normal Caso 1, análise discreta

A variação discreta da desaceleração normal permitiu observar uma ténue tendência nos tempos, quanto maior a variável menor o tempo de viagem como era de esperar teoricamente, conclusão esta que não tinha sido possível visualizar na análise refinada.

À medida que a variável estudada vai aumentando:

- $EMRP_{tempo}$  diminui o que significa que passam a existir menos secções com tempos simulados superiores aos modelados e inversamente o  $EMRN_{tempo}$  aumenta, a troca de posições ocorre na transição de 2,0 m/s<sup>2</sup> para 3,0m/s<sup>2</sup>;

- $EMR_{volumes}$  positivo e negativo são praticamente coincidentes e para a desaceleração normal de  $1,0m/s^2$  é perceptível um pequeno afastamento.

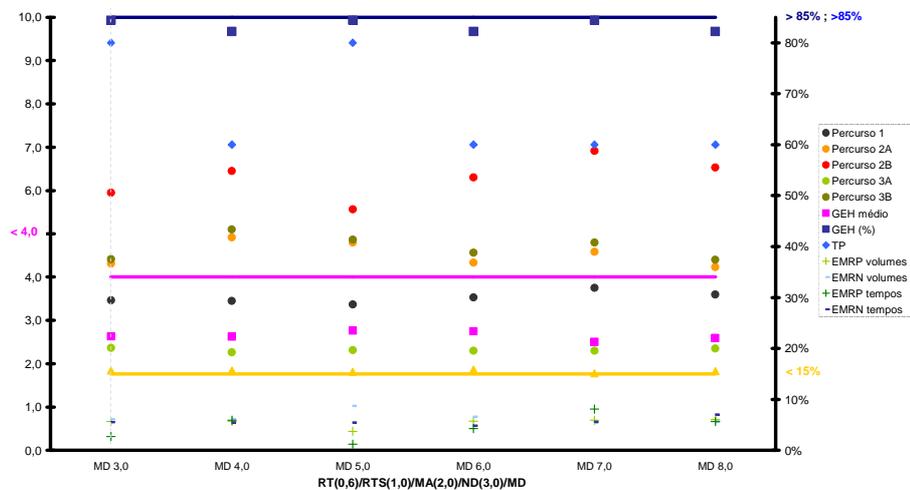


Fig. 5.25. – Desaceleração máxima Caso 1, análise discreta

Através da análise da figura 5.25 conclui-se que os volumes continuam a apresentar pouca variabilidade com a alteração da desaceleração máxima. Os erros médios relativos correspondentes aos volumes continuam com um comportamento muito próximo e comparativamente com o que acontece com outras variáveis estudadas, os tempos de percurso possuem alterações muito menores.

A análise deste gráfico assim como de todos os outros que representavam a variação da desaceleração normal permitem concluir que o desempenho do modelo não é sensível à alteração desta variável.

#### 5.7.4.3. Comparação com o caso base

A terceira etapa da análise 3 consistiu em fixar um dos casos de estudo seleccionados anteriormente (1 ou 2) como sistema “real” e proceder à mesma análise refinada (5.7.4.1.). Deste modo deixa de existir um erro inerente, uma vez que o caso de estudo eleito era a melhor aproximação e não o sistema real em si. Com a adopção do caso de estudo como base de comparação deixa de existir esse erro.

Com base na fraca influência das variáveis nos volumes, apenas foram escolhidos dois parâmetros baseados nestes: um relativo (RMSP) e um misto ( $\overline{GEH}$ ). Também é de esperar que nesta análise devido à fixação do caso de estudo como sistema real as oscilações de volumes sejam ainda menores. Para o cálculo dos parâmetros foram considerados todos os arcos da rede desde que possuíssem veículos a circular, uma vez que já não existe a limitação dos arcos observados.

Por outro lado foram adicionados mais parâmetros que avaliam os tempos, devido à grande variabilidade que estes têm apresentado. Para além dos resultados dos tempos de viagem ( $tt$ ) também foram considerados os atrasos ( $dt$ ) e os tempos parados ( $st$ ). Por definição o tempo de viagem é o tempo que um veículo demora a atravessar uma secção, o atraso é a diferença entre o tempo realmente utilizado e o expectável e o tempo parado corresponde ao que o veículo permanece imóvel. Estes tempos foram contabilizados da seguinte forma (no exemplo apresenta-se o cálculo referente aos tempos de viagem):

$$\frac{\sum tt_{caso_x} - \sum tt_{modelado}}{\sum tt_{caso_x}} \begin{cases} > 0 tt_- \\ < 0 tt_+ \end{cases} \quad (5.5)$$

Com:

$tt_{caso_x}$  - Tempo de viagem do caso base  $x$ ;

$tt_{modelado}$  - Tempo de viagem modelado.

Para o tempo de viagem foi adoptado um outro parâmetro adaptado da equação 5.3. e 5.4., o desvio do tempo médio relativo positivo (DTMRP) e o negativo (DTMRN).

As variáveis estudadas assim como os intervalos adoptados encontram-se de acordo com a análise refinada (5.7.4.1.).

Na figura 5.26. e 5.27. é apresentada graficamente a alteração do tempo de reacção. Apesar da divisão dos parâmetros temporais positivos e negativos não ser tão rigorosa como era esperado, denota-se uma tendência, do lado esquerdo de qualquer um dos casos de estudo encontram-se os valores negativos e do lado direito os positivos. Quanto à gama de valores para a qual o modelo apresenta maior sensibilidade é difícil de inferir uma vez que nos dois casos apesar de variar o tempo de reacção com valores distintos parece haver algumas semelhanças no comportamento atípico. Os resultados menos expectáveis têm a mesma posição da abcissa nos dois casos de estudo.

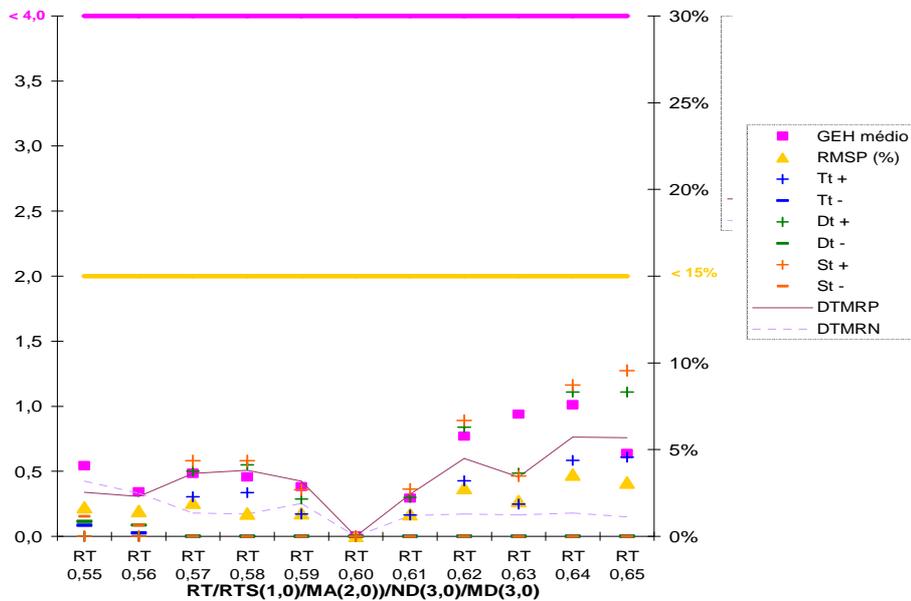


Fig. 5.26. – Comparação do tempo de reacção com o caso base 1

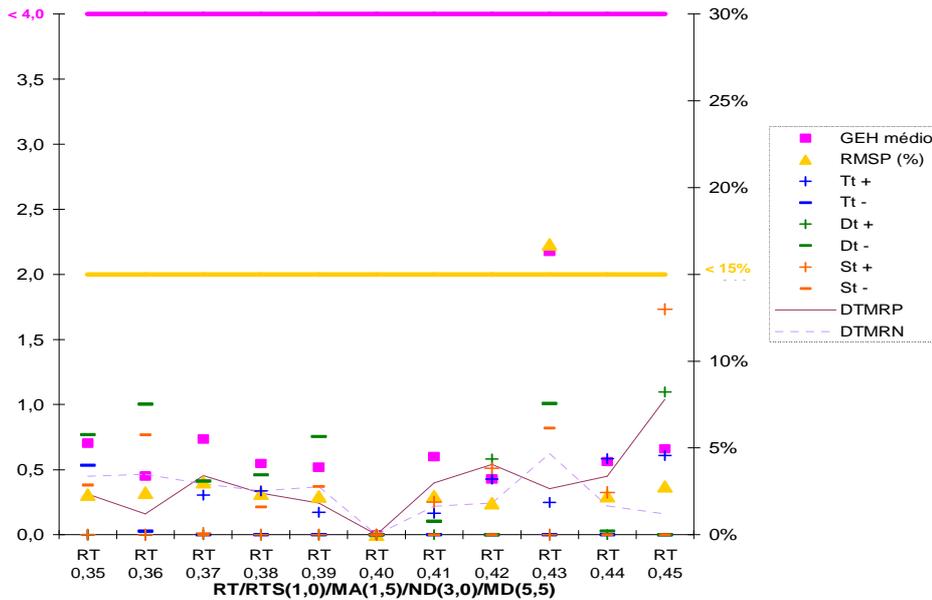


Fig. 5.27. – Comparação do tempo de reacção com o caso base 2

Os gráficos apresentados nas figuras 5.28 e 5.29 mostram que para acelerações menores os tempos modelados de viagem, os atrasos e os tempos parados são maiores. O desvio médio relativo positivo passa a ser menor que o negativo para acelerações superiores ao caso de estudo e vice-versa, mas a diferença é mais marcante no lado esquerdo do caso de estudo. Outro ponto interessante é que o modelo reage mais sensivelmente a alterações inferiores a 1,5 m/s<sup>2</sup>. Em relação aos volumes não se observa nenhuma tendência, a variação é muito ténue.

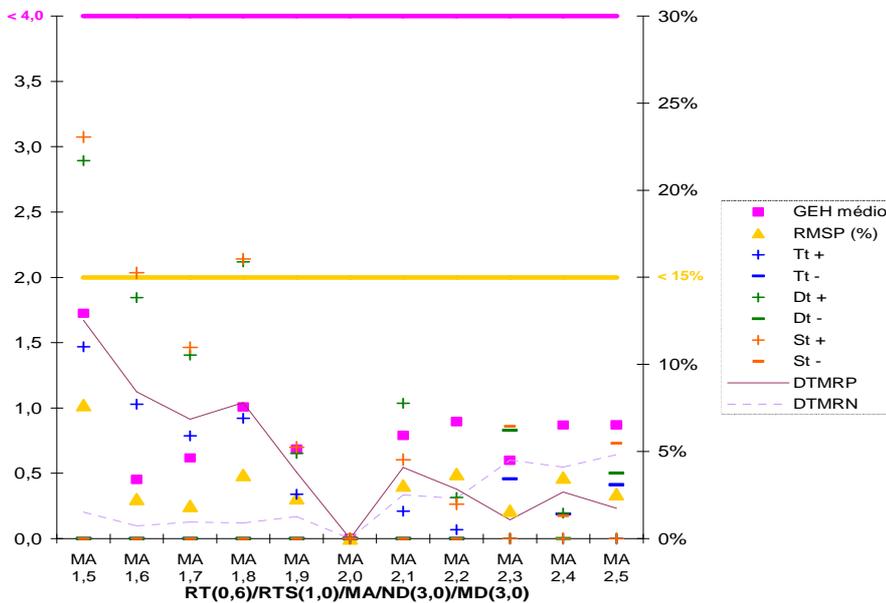


Fig. 5.28. – Comparação da aceleração máxima com o caso base 1

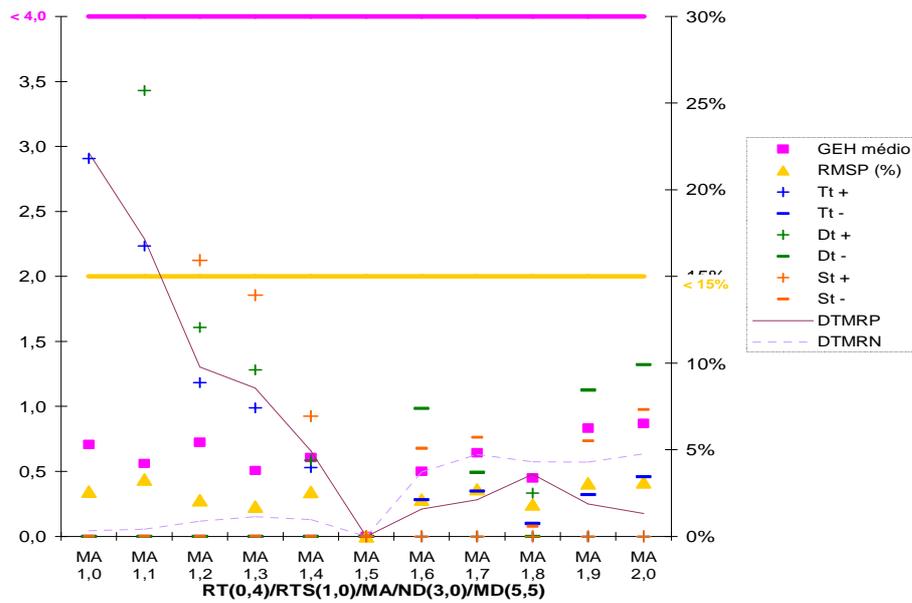


Fig. 5.29. – Comparação da aceleração máxima com o caso base 2

Com base nas variações apresentadas pode-se concluir que aceleração máxima é uma variável com impacto no modelo.

A análise dos gráficos apresentados nas figuras 5.30 e 5.31 não permite retirar conclusões. As variações dos parâmetros têm menores amplitudes que nos casos anteriores e não mostram qualquer tendência.

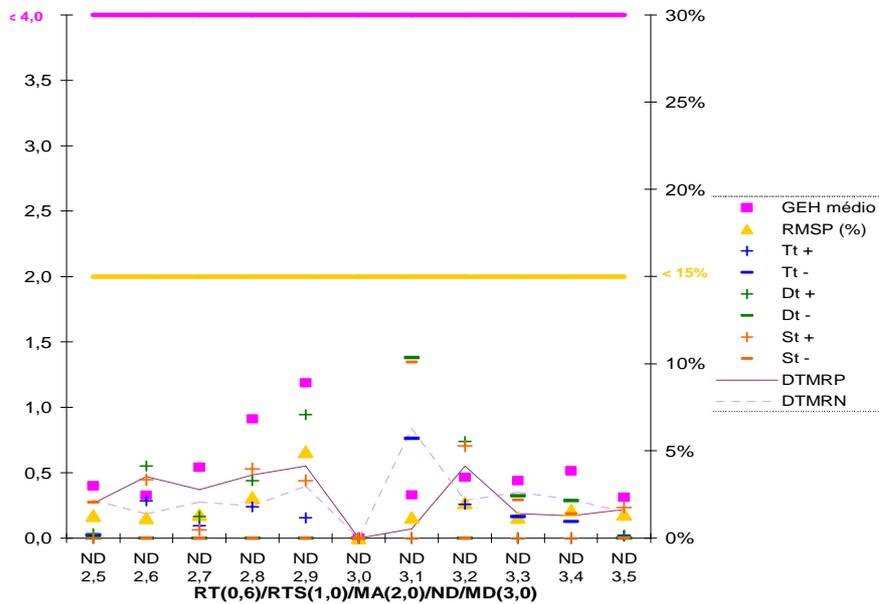


Fig. 5.30. – Comparação da desaceleração normal com o caso base 1

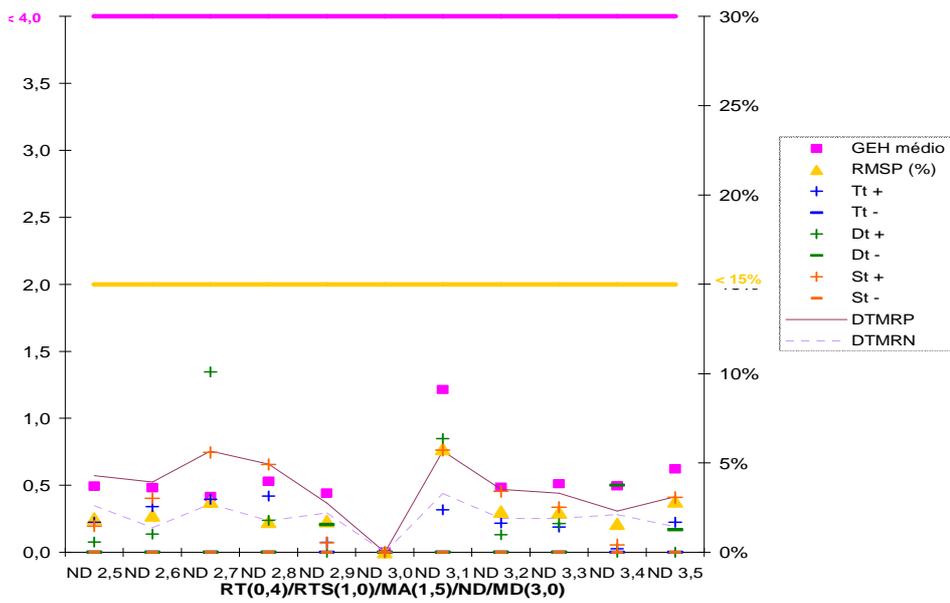


Fig. 5.31. – Comparação da desaceleração normal com o caso base 2

A alteração da desaceleração máxima (cf figuras 5.32 e 5.33), como foi concluído noutras análises não possui impacto relevante no desempenho do modelo. No caso 1 ainda se denota uma redução (acidentada) do tempo modelado à medida que a variável vai aumentando entre os 2,5 m/s<sup>2</sup> e os 3,0 m/s<sup>2</sup>. No entanto de modo global, tendo especial atenção o caso 2, os gráficos são quase simétricos em relação ao ponto do caso base, o que vem reafirmar que o modelo não é sensível a esta variável.

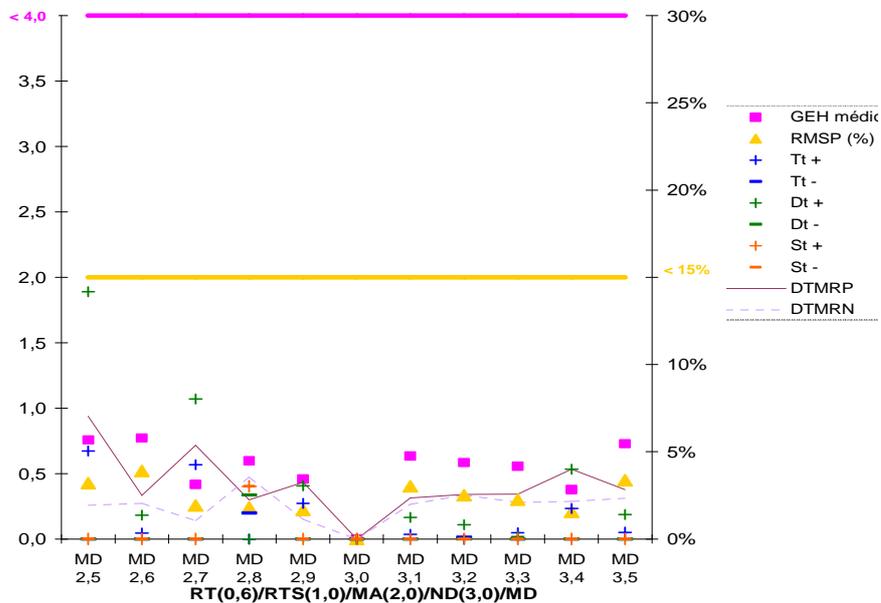


Fig. 5.32. – Comparação da desaceleração máxima com o caso base 1

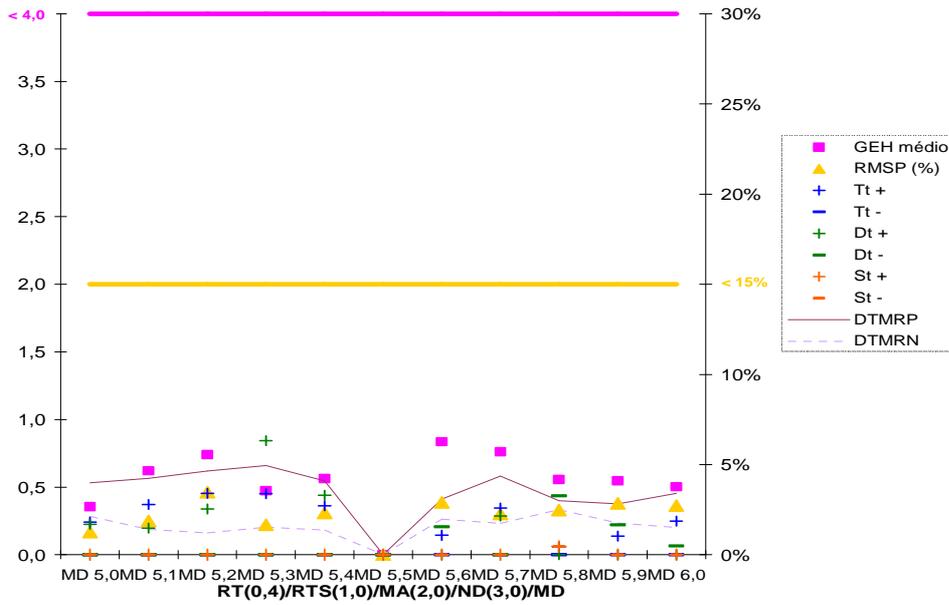


Fig. 5.33. – Comparação da desaceleração máxima com o caso base 2

Pela análise dos dois gráficos a seguir apresentados (figura 5.34 e 5.35) pode-se concluir que o modelo apresenta grande sensibilidade à alteração da velocidade média. Esta dedução baseia-se na enorme semelhança entre as duas representações, independentemente do caso base a variação da velocidade apresenta a mesma configuração.

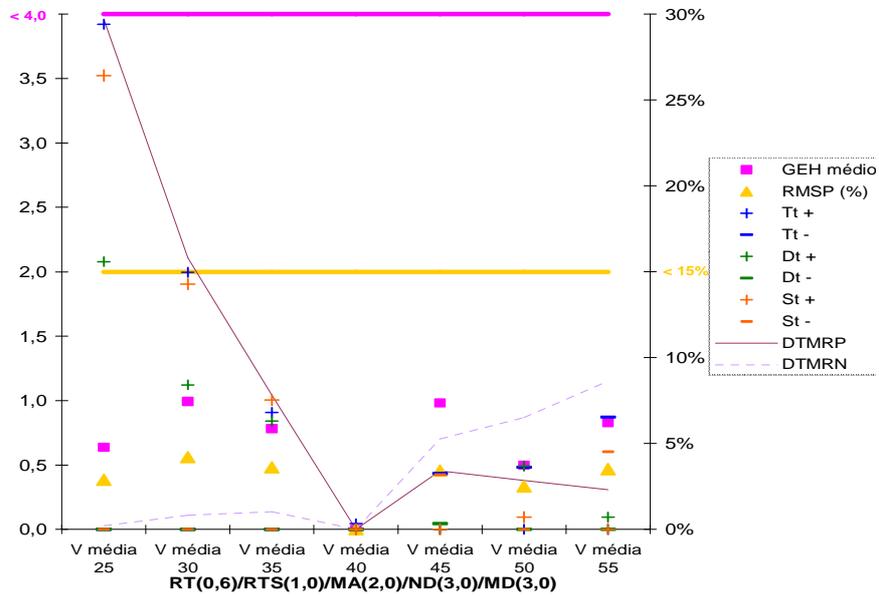


Fig. 5.34. – Comparação da velocidade com o caso base 1

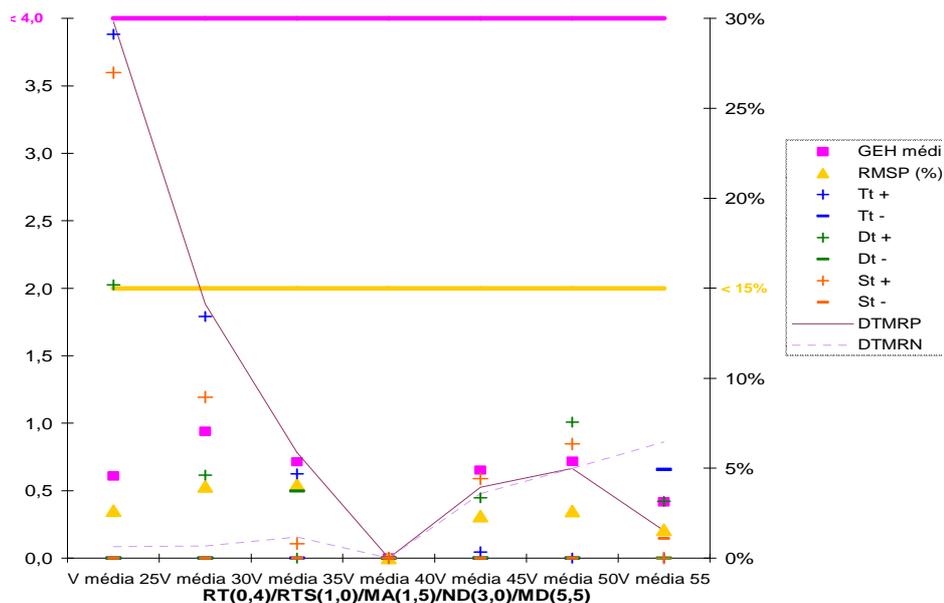


Fig. 5.35. – Comparação da velocidade com o caso base 2

Assim, velocidades de veículos ligeiros mais baixas aumentam fortemente o tempo dispendido em viagem e o tempo parado durante a simulação. Para velocidades superiores os tempos simulados são inferiores aos “reais” mas, a diferença é menor do que para velocidades menores. Para velocidades iguais ou superiores a 50km/h parece existir uma perturbação na simulação, que como já foi comentada anteriormente pensa-se ser devido à coincidência da velocidade do veículo com a permitida na secção.

## 5.8. CONCLUSÕES DA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

A utilização de análises de sensibilidade em modelos de simulação de tráfego permite a realização de inúmeras simulações de um modo controlado e sistemático, que não seria possível no sistema real. Esta aplicação permite gerar um vasto grupo de resultados, pela alteração dos valores das variáveis, com o intuito de conhecer o impacte no desempenho no modelo.

De acordo com as análises e estudos elaborados ao longo deste trabalho foi possível concluir que a nível dos parâmetros e critérios existentes de calibração para redes microscópicas:

- a) Apesar de os volumes serem resultados de fácil recolha e de obrigatoriedade para a fase de construção do modelo, o impacte da alteração dos valores das variáveis é reduzido. Os tempos de percurso/viagem possuem muito mais sensibilidade às análises de sensibilidade. Observe-se que estas duas constatações seriam expectáveis face ao tipo de modelo utilizado (em que a afectação das viagens à rede não é realizada) pelo que a análise dos parâmetros calculados com base nos volumes apenas inferem sobre o carregamento da rede;
- b) Os vários parâmetros de aferição utilizados ao longo dos testes nem sempre se mostraram adequados ao modelo apesar de referenciados em vários estudos (coeficiente de correlação e o coeficiente de *Theil* são um exemplo disto mesmo), tendo sido feito um esforço para adoptar os melhores para cada teste.
  - O coeficiente de correlação ao longo das mais de três centenas de testes decorridos apresentou sem excepção valores iguais a 0,97, sendo importante referir que o critério fixava

como valor mínimo 0,80. Uma vez que o parâmetro se mantém constante quaisquer que sejam os valores adoptados para as variáveis, não é adequado para aferir a sensibilidade.

- O coeficiente de *Theil* e seus componentes apesar de poderem ser aplicados globalmente ao modelo não trazem qualquer acréscimo à interpretação de resultados. Contudo a sua aplicação individual aos arcos permite uma boa análise na rede. É de referir que o seu cálculo e sua representação na rede são tarefas muito morosas uma vez que não existe um processo automático. No capítulo 3 foi explicado que este coeficiente podia ser calculado de um modo automático pelo AIMSUN contudo não pode ser exportado, obrigando à sua consulta de arco em arco.
- O  $\overline{GEH}$  permitiu retirar algumas conclusões sobre o funcionamento do modelo. Contudo o critério associado a este parece ser pouco restritivo tendo sido cumprido com grande margem quase na totalidade dos casos.
- Os critérios mais restritivos foram: o GEH% e o TP. O critério do TP não foi cumprido por nenhum caso mas é de salientar que basta apenas um percurso não satisfazer para o critério não ser cumprido. Era prudente que juntamente com a fórmula de cálculo e o critério fosse fixado a “dimensão” dos percursos e características que se aplicam de modo a tornar o parâmetro mais credível por parte dos modeladores.
- Tanto para os volumes como para os tempos, os parâmetros existentes na bibliografia da especialidade não diferenciam de modo claro os erros sub e sobrestimados, o que dificulta a clareza da análise.

c) Face à constatação de uma maior sensibilidade aos tempos nos testes elaborados seria de esperar que houvesse um maior conjunto de parâmetros para os avaliar. De modo a resolver esta deficiência alguns parâmetros foram adaptados para os tempos de viagem, os atrasos e os tempos parados.

Relativamente às variáveis e intervalos de alteração escolhidos pode-se concluir o seguinte:

- a) As variáveis com mais impacto no desempenho do modelo por ordem de importância são: a velocidade, o tempo de reacção e a aceleração máxima. Todas as outras variáveis têm um impacto menor com destaque para a desaceleração máxima.
- b) Em relação aos valores adoptados também é possível retirar algumas conclusões:
  - O tempo de reacção apresenta melhores resultados entre os 0,40 e os 0,60 segundos. Para intervalos de simulação de 0,2 segundos o modelo tem um comportamento irregular talvez por ser um intervalo demasiado pequeno.
  - O modelo parece bastante sensível a velocidades inferiores a 40 km/h, quando a velocidade do veículo se aproxima do valor da de secção o modelo tem um comportamento mais irregular.
  - A aceleração máxima é uma variável com impacte no modelo, para valores inferiores a 1,7 m/s<sup>2</sup> a sua sensibilidade dispara.
  - A transição entre 2,0 e 3,0 m/s<sup>2</sup> de desaceleração normal é a faixa onde se encontra a maior influência sendo quase nula nas restantes transições.

Em relação à rede onde a análise de sensibilidade foi aplicada, pode-se concluir que as secções não prioritárias são as mais sensíveis às alterações das variáveis sendo esse impacte agravado quanto maior for a procura nestas.

Por último será de salientar a ausência da capacidade de modelar o estacionamento por parte do AIMSUN o que dificulta, em certas situações, a aproximação do sistema modelado ao real.



# 6

## CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

### 6.1. PRINCIPAIS CONCLUSÕES

Os modelos microscópicos de simulação de tráfego são ferramentas fundamentais no planeamento, no projecto e na gestão de redes viárias. Possibilitam retirar conclusões e testar novas técnicas sem ser necessário perturbar o sistema real e proceder a nova recolha de dados, sendo estas as grandes vantagens dos modelos de simulação que tornam o seu uso tão importante. Outra potencialidade do modelo de simulação é a disponibilização de informação com sequência temporal e espacial, tanto em termos de valores médios como dos seus desvios. Porém é importante reter que o uso destes modelos nem sempre é a melhor alternativa para solucionar o problema. A simulação exige disponibilidade de tempo e volumes de informação que por vezes não é fácil de obter.

Por outro lado, os modelos são apenas representações sendo inevitável recorrer a algumas simplificações, que resultam numa aproximação da realidade. A correcta aplicação de modelos exige o seu domínio de modo a discernir quais as simplificações que podem ser feitas para que o impacto nos resultados da rede não seja excessivo. Os resultados do modelo são avaliados nas complexas fases de calibração e posterior validação através do cálculo dos parâmetros de calibração.

O presente trabalho foi desenvolvido no sentido de alargar o conhecimento e tornar mais consistente a aplicação dos modelos microscópicos em redes urbanas, identificando os parâmetros e as variáveis que mais se destacam na calibração. Utilizou-se com sucesso o modelo microscópico de simulação AIMSUN aplicado à zona urbana da Asprela., localizada na cidade do Porto. Este programa permitiu modelar o controlo de tráfego actuado e adaptativo presente na rede assim como o metropolitano, observando-se que outros programas informáticos não possuem tais capacidades. No entanto, a ausência da capacidade do programa em modelar o estacionamento paralelo em via pública não possibilitou a adequada modelação das condições de tráfego nalguns arcos, tendo consequências na representatividade da rede.

Foi desenvolvida uma análise de sensibilidade, de modo a avaliar a susceptibilidade dos resultados do modelo (volumes e tempo de viagem) face à variação de apenas uma ou mais variáveis em simultâneo e quais os parâmetros que melhor se adequam.

Das seis variáveis estudadas as que apresentaram maior impacte no desempenho do modelo foram a velocidade, o tempo de reacção e a aceleração máxima, por ordem decrescente de impacte.

Quanto aos resultados escolhidos como representativos da qualidade do modelo é possível concluir que a alteração das variáveis tem um impacte reduzido sobre os volumes e profundo nos tempos de

percurso. No entanto, quase todos os parâmetros se baseiam nos volumes. Parâmetros como o coeficiente de correlação amostral e o coeficiente de *Theil* aplicado de modo global, apesar de referenciados em vários estudos, não são conclusivos.

Em relação à rede onde a análise de sensibilidade foi aplicada, pode-se concluir que as secções não prioritárias são as mais sensíveis às alterações das variáveis sendo esse impacto agravado quanto maior for a procura.

De modo geral, face ao trabalho efectuado, a alteração das variáveis não apresentou uma tendência de valores clara.

## 6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

No futuro o programa de simulação AIMSUN deveria incluir a possibilidade de modelar o estacionamento na via pública e conseqüente perda de capacidade dos arcos, ferramenta indispensável na aplicação deste modelo em meio urbano. A nível de cálculo de parâmetros por parte do programa seria interessante que este permitisse a exportação dos componentes do coeficiente de *Theil* para a totalidade dos arcos.

A investigação de parâmetros de calibração deveria desenvolver mais elementos capazes de avaliar os resultados dos tempos de viagem, uma vez que apresentam grande sensibilidade em modelos microscópicos. O único parâmetro descrito na bibliografia como aplicável aos tempos de viagem (TP) deveria ser acompanhado de informações sobre a rede onde pode ser aplicável, como o tamanho de cada percurso. Também seria importante que os parâmetros conseguissem demonstrar o erro de modo relativo, indicando se se trata de uma sub ou sobrestimativa.

Para contribuir para a fundamentação deste trabalho o estudo deveria ser alargado às restantes variáveis e prolongado o intervalo de variação. Seria interessante realizar estudos semelhantes noutras redes de modo a poder retirar conclusões mais gerais, evitando o efeito de singularidades que possam existir na rede que foi modelada.

Tendo-se verificado que os parâmetros não fornecem indicações muito conclusivas, seria importante utilizar outros, que não foram considerados neste trabalho por não estarem associados a critérios de aceitação. Uma outra possibilidade, consideravelmente arrojada, consistiria em desenvolver novos parâmetros, que se revelem adequados para redes do tipo da estudada. Para validar tais parâmetros seria indispensável aplicá-los a uma grande quantidade de redes, com todo o esforço de codificação e de recolha de dados de tráfego que lhes está associado.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Cunnard, R., Lieu, H., Mahmassani, H. *Traffic flow theory*. Transportation Research Board Special Report 165 de 1975.
- [2] Hoogendoorn, S., Bovy, P. *State-of-the-art of vehicular traffic flow modelling*. Proceedings of the I MECH Engineers Part I: Journal of Systems & Control Engineering, 19/08/2001, 283-303, Professional Engineering Publishing.
- [3] Sítio da Internet [www.roadtraffic-technology.com/](http://www.roadtraffic-technology.com/) 19/02/2008
- [4] Scherr, W., Adams, D., Bauer, T. *An Integrated Model for Planning and Traffic Engineering*. Transportation Research Board April 2003 Annual Meeting, Louisiana.
- [5] Barceló, J., Bernauer, E., Breheret, L., Canepari, G., Taranto, C., Ferrer, J., Fox, K., Gabard, J.F., Liu, R. *SMARTTEST – Simulation Modelling Applied to Road Transport European Scheme Tests*. <http://www.its.leeds.ac.uk/smartest>. 02/09/2008.
- [6] Barceló, J., Casas, J. *Methodological notes on the calibration and validation of Microscopic Traffic Simulation Models*. Transportation Research Board 2004 Annual Meeting, Janeiro de 2004, Washington D.C.
- [7] Rao, L., Owen, L., Goldsam, D. *Development and Application of a Validation Framework for Traffic Simulation Models*. Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference.
- [8] AIMSUN Microsimulator 5.0 User's Manual TSS – Transporting Simulation Systems, 2005
- [9] Dowling, R., Skabardonis, A., Alexiadis, V. *Traffic Analysis Toolbox Volume III: Guidelines for Applying Traffic Microsimulation Modeling Software*. Lindeley, J, Washington D.C., Junho de 2004.
- [10] Hourdakakis, J., Michalopoulos, P., Kottomannil, J. *A Practical Procedure for Calibrating Microscopic Traffic Simulation Model*. Transportation Research Board 2003 Annual Meeting, Janeiro de 2003, Washington D.C.
- [11] Bloomberg, L., Dale, J. *A Comparison of the VISSIM and CORSIM Traffic Simulation Models*. Institute of Transportation Engineers Annual Meeting Agosto de 2000.
- [12] Tavares, J. *Aplicabilidade e Robustez de Modelos de Afecção de Tráfego em Redes Urbanas*. Dissertação de Doutoramento em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2003.
- [13] Haas, C. *Assessing Developments Using AIMSUN*. IPENZ Transporting Group, /12/09/2001, Auckland.
- [14] Vliet, D. *Sturn 10.2 User Manual*, Instituturw for Transport Studies, University of Leeds, 2002.
- [15] Dowling, R., Holland, J., Huang, A. *Guidelines for Applying Traffic Microsimulation Modeling Software*. Dowling Associates, Oakland-California, 2002.
- [16] *AIMSUN Microscopic Traffic Simulator: a tool for the analysis and assessment of ITS systems*. [www.aimsun.com](http://www.aimsun.com), 2007/06/21.
- [17] AIMSUN User's Manual – version 1.0.6., TSS – Transporting Simulation Systems, 2005.
- [18] Ministério da Administração Interna. *Código da Estrada*. [www.dgv.pt](http://www.dgv.pt). 03/04/2008
- [19] Edholm, J., Kosonen, I., Davidsson, F. *TPMA model 1 calibration draft report*. Royal Institute of Technology 27/05/1998, 35p, Stockolm.

- [20] Barceló, J., Prado, S. *Methodological note on the calibration and validation of Microscopic Traffic Simulation Models*. AIMSUN Training Course, 23-24 de Novembro de 2006.
- [21] Sítio da Internet [www.metroporto.pt](http://www.metroporto.pt). 03/03/2008.
- [22] Martins, N. *Planeamento e Traçado de Vias Urbanas*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2002.
- [23] Sítio da Internet [www.stcp.pt](http://www.stcp.pt). 11/02/2008.
- [24] Dueker, K., Kimpel, T., Strathman, J. *Determinants of Bus Dwell Time*. Journal of Public Transportation, volume 7, nº 1, 2004, 21-41p, Editor Gary Brosh, Florida.
- [25] Saraf, S. *Micro-Simulation of Traffic Using AIMSUN*. Indian Institute of Technology Guwahati. 2006.
- [26] Chu, L., Liu, H., Oh, J., Recker, W. *A Calibration Procedure for Microscopic Traffic Simulation*. Intelligent Transportation Systems Proceedings 2003 IEEE, 12 -15 de Outubro de 2003, 1574-1579 vol.2.

## **ANEXO 1**

### **Contagens Direccionais de Tráfego**

## PREPARAÇÃO E REALIZAÇÃO DAS CONTAGENS

Para a realização das contagens de tráfego foram recrutados colaboradores para o preenchimento das fichas de campo. Os dezassete operadores que cooperaram nesta etapa eram provenientes do 2º, 4º e 5º ano do Mestrado Integrado de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Numa segunda fase, para cada nó integrante da rede foram analisadas todos os movimentos permitidos, verificando quais podiam ser deduzidos, não sendo assim necessária a sua contabilização. Deste modo foi possível otimizar a utilização dos operadores. Os movimentos deduzidos encontram-se assinalados a preto nas folhas de resultados, tabela 1. Para aplicar esta simplificação foi necessário proceder à recolha de dados nos nós dependentes no mesmo dia.

Após a identificação dos movimentos a serem recolhidos, iniciou-se a construção das folhas de contagens. Estas teriam de cumprir o objectivo de serem de fácil compreensão e preenchimento por parte dos operadores, assim como de análise por parte da autora do trabalho. Cada folha possui o número de identificação do nó, a data do levantamento, o nome do operador que o realizou, as categorias dos veículos a diferenciar e o esquema com os respectivos movimentos a serem contabilizados de modo a facilitar a compreensão.

Por uma questão de recursos humanos e tempo disponível, nenhum nó foi contabilizado mais do que uma vez. Foi considerado que o dia da contagem correspondia a um dia tipo, razão pela qual se optou por realizar as contagens de terça a quinta-feira. Em seguida, na figura 1, apresenta-se um exemplo de uma folha de contagem, na sua versão final.



A escolha do ponto de encontro dos operadores teve em consideração o conhecimento da sua localização por parte de todos, assim como a sua relativa proximidade aos postos de contagens, representados na figura 3.

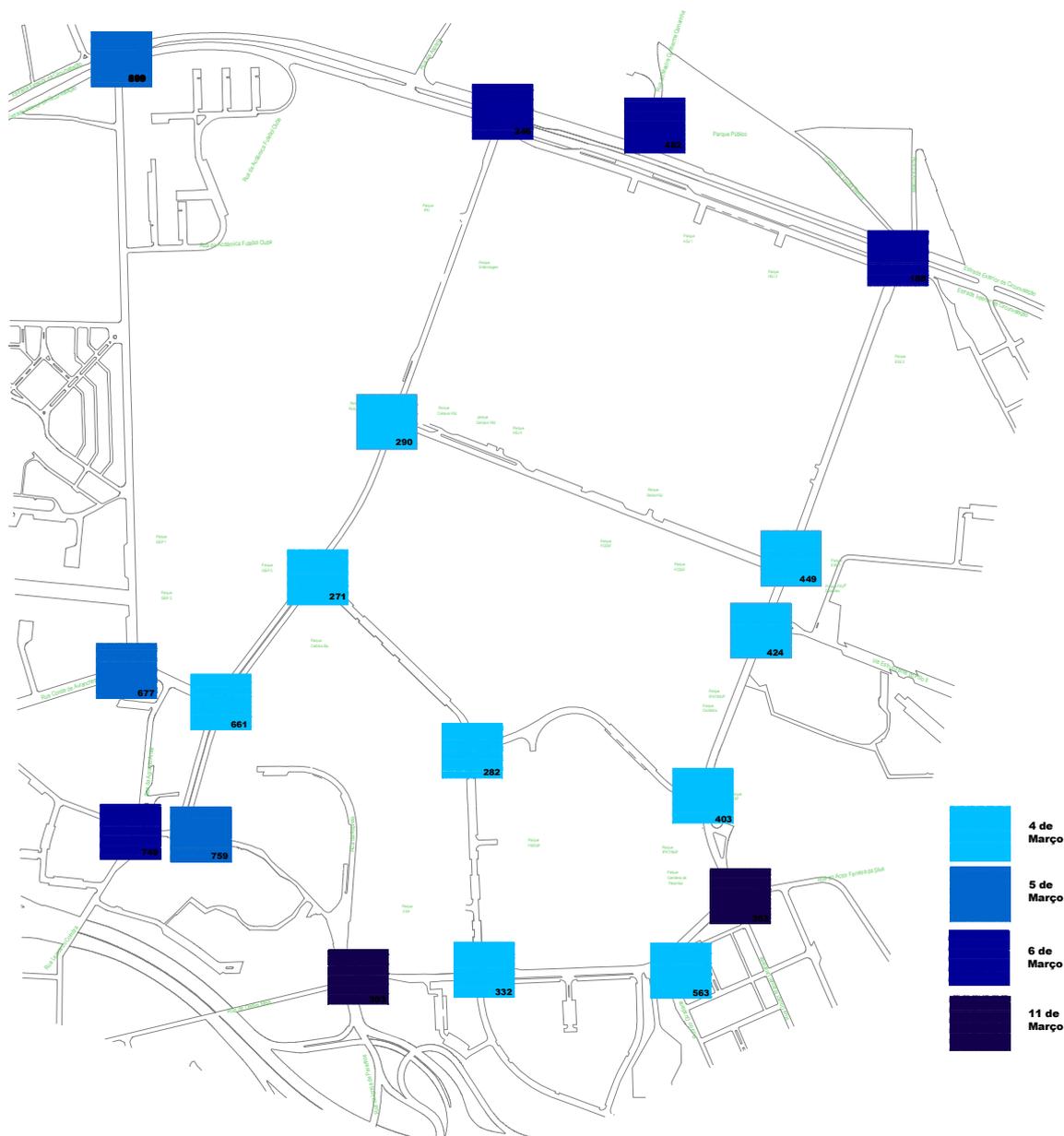


Fig. 3 – Localização dos postos de contagens e respectivo dia de contagem

O período de contagem decorreu durante uma hora ininterruptamente (7:45h-8:45h), em que cada operador deveria contabilizar e diferenciar cada tipo de veículos, individualizando o registo em 4 intervalos de quinze minutos (7:45h-8:00h, 8:00h-8:15h, 8:15h-8:30h e 8:30h-8:45h). Os veículos da STCP não foram ser contabilizados em nenhuma das categorias de veículos de modo a evitar a duplicação dos mesmos, uma vez que são gerados pelo software AIMSUN.

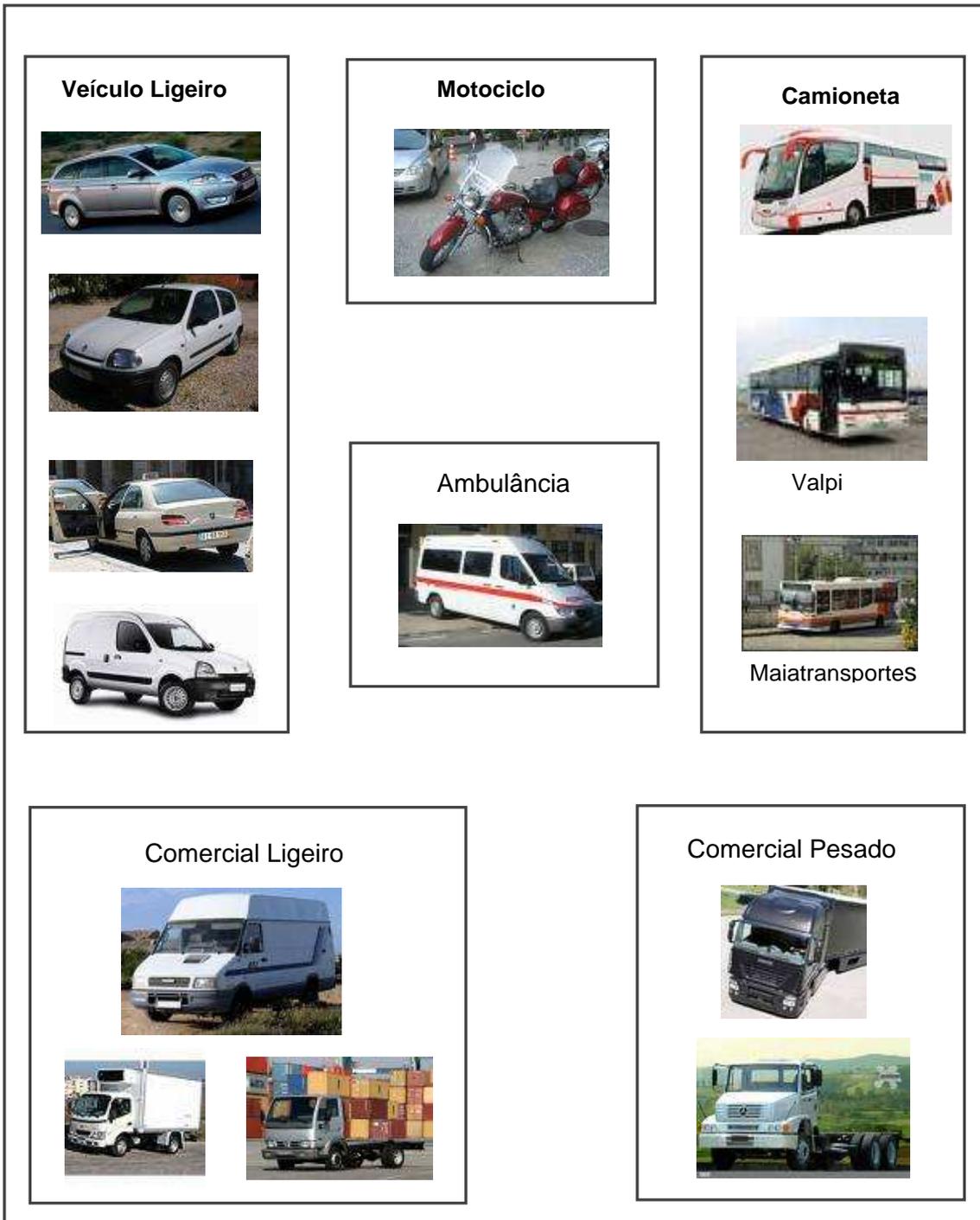


Fig. 4 – Tipos de Veículos

Nos dias 12 e 13 de Março de 2008 foram contabilizadas as entradas e saídas de veículos nos parques 1 e 2 do Instituto Superior de Engenharia do Porto, parque da Faculdade de Psicologia e parque da Faculdade de Medicina Dentária ambas da Universidade do Porto, tabela 3. Para os restantes parques foram usados os valores presentes na tabela 2 disponibilizados pelo Professor Álvaro Costa e Engenheiro Pedro Abrantes, recolhidos em Maio de 2006, em que a modeladora deste trabalho participou.

## LEITURA E ANÁLISE DE RESULTADOS

Preenchida a totalidade das folhas de campo realizou-se a sua informatização. Com o auxílio de folhas de cálculo do Excel, Software da Microsoft, foi possível deduzir com rigor e confiança os movimentos não contabilizados. Os dois dados de entrada necessários na opção *Traffic Demand* do AIMSUN são o número de veículos que afluem ao nó através de cada arco (tabela 1) e a probabilidade dos diferentes movimentos possíveis, como exemplificado na figura 5.

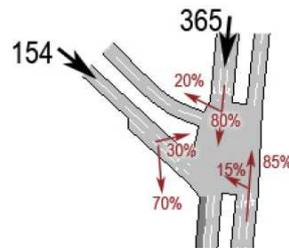


Fig 5 – Exemplo dos inputs, retirado do tutorial 1 do software

Por vezes no cálculo das percentagens surgiu o erro “#div/0”. Este erro ocorre sempre que a uma secção não afluí nenhum veículo de determinada categoria, não sendo assim possível determinar a probabilidade dos movimentos. Para resolver esta questão foi adoptado um conjunto de critérios, apresentados em seguida pela ordem a cumprir, de modo a ser possível inferir qual a percentagem a adoptar.

- Percentagem do quarto de hora anterior;
- Percentagem do quarto de hora seguinte;
- No caso de ambulâncias ou motociclos, qualquer movimento tem igual probabilidade;  
No caso de camionetas os movimentos têm igual probabilidade aos veículos comerciais pesados e vice-versa.

Com estes critérios todos os casos que apresentavam erros foram resolvidos.

## **TABELA 1**

Resultados da recolha de dados em nós (2008).

Data	Intersecção	Movimento	Período horário	CATEGORIA DE VEÍCULOS					
				V. Ligeiro	Motociclo	Ambulância	Camioneta	Comercial	
								Ligeiro	Pesado
06-03-2008	<p style="text-align: center;">188</p> <p style="text-align: center;">Circunvalação</p> <p style="text-align: center;">Rua Dr. Roberto Frias</p>	1	7:45 - 8:00	252	9	0	9	16	1
			8:00 - 8:15	206	1	2	5	17	1
			8:15 - 8:30	248	3	3	7	11	1
			8:30 - 8:45	258	3	3	4	14	0
		2	7:45 - 8:00	160	4	0	2	18	0
			8:00 - 8:15	160	1	1	1	13	2
			8:15 - 8:30	155	1	0	1	8	0
			8:30 - 8:45	187	0	0	0	6	2
		3	7:45 - 8:00	16	1	1	1	0	0
			8:00 - 8:15	26	0	0	0	0	0
			8:15 - 8:30	9	0	0	0	0	0
			8:30 - 8:45	45	0	0	0	0	1
		4	7:45 - 8:00	1	0	0	3	0	0
			8:00 - 8:15	5	0	1	2	0	0
			8:15 - 8:30	1	0	1	3	0	0
			8:30 - 8:45	6	0	1	0	0	0
		5	7:45 - 8:00	37	2	0	1	2	0
			8:00 - 8:15	49	0	0	1	2	2
			8:15 - 8:30	58	0	0	0	6	1
			8:30 - 8:45	59	0	0	0	1	0
		6	7:45 - 8:00	15	0	1	1	2	0
			8:00 - 8:15	32	0	0	2	4	0
			8:15 - 8:30	43	0	0	3	2	0
			8:30 - 8:45	41	0	1	1	2	0
		7	7:45 - 8:00	23	0	0	0	3	0
			8:00 - 8:15	28	0	0	0	2	0
			8:15 - 8:30	19	0	0	0	2	0
			8:30 - 8:45	32	0	0	0	5	0
		8	7:45 - 8:00	8	1	0	0	1	0
			8:00 - 8:15	8	0	0	0	0	0
			8:15 - 8:30	6	0	0	0	1	0
			8:30 - 8:45	13	0	0	0	0	0
		9	7:45 - 8:00	13	0	0	0	0	0
			8:00 - 8:15	24	0	0	0	0	0
			8:15 - 8:30	17	0	0	0	3	0
			8:30 - 8:45	25	0	0	0	1	0
		10	7:45 - 8:00	5	0	0	1	0	0
			8:00 - 8:15	14	0	0	2	3	0
			8:15 - 8:30	22	0	1	2	1	0
			8:30 - 8:45	35	0	0	2	0	0
		11	7:45 - 8:00	37	0	0	1	0	0
			8:00 - 8:15	19	0	1	0	1	0
			8:15 - 8:30	19	0	0	0	0	0
			8:30 - 8:45	20	0	0	0	0	0

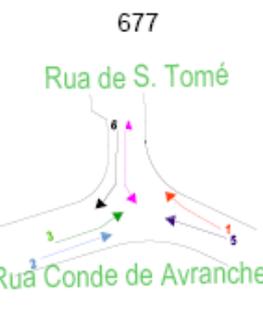
Data	Intersecção	Movimento	Período horário	CATEGORIA DE VEÍCULOS					
				V. Ligeiro	Motociclo	Ambulância	Caminioneta	Comercial	
								Ligeiro	Pesado
06-03-2008	<p style="text-align: center;">246</p> <p style="text-align: center;">Estrada Interior da Circunvalação</p> <p style="text-align: center;">Rua António Bernardino Almeida</p>	1	7:45 - 8:00	173	2	0	1	2	0
			8:00 - 8:15	210	3	0	5	13	1
			8:15 - 8:30	192	2	0	2	17	0
			8:30 - 8:45	235	1	1	1	10	0
		2	7:45 - 8:00	137	2	1	5	7	0
			8:00 - 8:15	158	1	1	1	20	0
			8:15 - 8:30	154	1	2	1	7	0
			8:30 - 8:45	166	0	0	0	15	1
		3	7:45 - 8:00	92	2	3	1	2	0
			8:00 - 8:15	161	0	4	0	10	0
			8:15 - 8:30	150	1	3	1	2	0
			8:30 - 8:45	116	0	2	1	3	0
		4	7:45 - 8:00	67	1	2	0	0	0
			8:00 - 8:15	102	1	4	4	0	0
			8:15 - 8:30	89	1	0	2	1	0
			8:30 - 8:45	70	2	0	5	1	0
		5	7:45 - 8:00	82	2	0	2	2	0
			8:00 - 8:15	129	1	3	3	5	0
			8:15 - 8:30	105	0	2	3	5	0
			8:30 - 8:45	129	0	3	0	5	2
		6	7:45 - 8:00	29	2	0	3	1	0
			8:00 - 8:15	30	1	0	2	0	0
			8:15 - 8:30	23	0	0	4	4	1
			8:30 - 8:45	41	1	1	0	3	0
04-03-2008	<p style="text-align: center;">271</p> <p style="text-align: center;">Rua António Bernardino Almeida</p>	1	7:45 - 8:00	125	0	1	0	6	0
			8:00 - 8:15	92	0	3	0	3	0
			8:15 - 8:30	112	0	1	0	1	0
			8:30 - 8:45	108	0	1	0	0	0
		2	7:45 - 8:00	91	0	2	5	7	0
			8:00 - 8:15	117	0	5	1	11	0
			8:15 - 8:30	150	0	3	2	5	0
			8:30 - 8:45	144	1	4	1	6	0
		3	7:45 - 8:00	64	2	3	5	0	2
			8:00 - 8:15	62	0	6	2	0	0
			8:15 - 8:30	31	0	6	1	0	1
			8:30 - 8:45	57	0	4	1	1	0
04-03-2008	<p style="text-align: center;">282</p> <p style="text-align: center;">Psicologia</p> <p style="text-align: center;">F. Dentária</p>	1	7:45 - 8:00	37	0	1	0	0	0
			8:00 - 8:15	51	0	1	0	8	0
			8:15 - 8:30	37	0	0	0	2	0
			8:30 - 8:45	50	0	2	0	3	0
		2	7:45 - 8:00	108	1	2	4	5	0
			8:00 - 8:15	148	1	6	2	11	0
			8:15 - 8:30	156	1	4	1	3	0
			8:30 - 8:45	174	1	3	1	6	1
		3	7:45 - 8:00	73	0	6	0	1	0
			8:00 - 8:15	89	0	0	0	0	0
			8:15 - 8:30	54	0	1	0	0	0
			8:30 - 8:45	43	0	0	0	0	0

Data	Intersecção	Movimento	Período horário	CATEGORIA DE VEÍCULOS					
				V. Ligeiro	Motociclo	Ambulância	Caminhoneira	Comercial	
								Ligeiro	Pesado
04-03-2008	<p style="text-align: center;">290</p>	1	7:45 - 8:00	51	1	5	1	1	1
			8:00 - 8:15	45	0	6	1	3	0
			8:15 - 8:30	32	0	8	0	0	0
			8:30 - 8:45	78	0	7	1	3	0
		2	7:45 - 8:00	94	1	0	9	4	1
			8:00 - 8:15	119	0	5	2	4	0
			8:15 - 8:30	138	0	1	3	4	1
			8:30 - 8:45	109	1	1	1	4	0
		3	7:45 - 8:00	4	0	0	0	0	0
			8:00 - 8:15	4	0	0	0	0	0
			8:15 - 8:30	3	0	0	0	0	0
			8:30 - 8:45	10	0	0	0	0	0
10-03-2008	<p style="text-align: center;">303</p>	1	7:45 - 8:00	15	0	0	0	0	0
			8:00 - 8:15	29	0	0	0	2	0
			8:15 - 8:30	12	0	0	0	1	0
			8:30 - 8:45	18	0	0	0	0	0
		2	7:45 - 8:00	45	0	1	1	4	0
			8:00 - 8:15	65	0	4	0	3	0
			8:15 - 8:30	69	0	0	0	4	0
			8:30 - 8:45	85	0	3	0	11	0
		3	7:45 - 8:00	130	0	1	0	11	1
			8:00 - 8:15	142	0	5	1	13	0
			8:15 - 8:30	153	0	4	0	6	0
			8:30 - 8:45	127	1	2	1	4	1
		4	7:45 - 8:00	115	0	2	1	5	0
			8:00 - 8:15	140	1	4	1	5	0
			8:15 - 8:30	179	1	5	3	8	0
			8:30 - 8:45	139	0	5	0	0	0
		5	7:45 - 8:00	38	0	0	0	0	0
			8:00 - 8:15	72	0	1	0	1	0
			8:15 - 8:30	50	0	1	2	3	0
			8:30 - 8:45	102	0	1	0	3	0
		6	7:45 - 8:00	10	0	0	0	1	0
			8:00 - 8:15	12	0	0	0	0	0
			8:15 - 8:30	18	0	0	0	0	0
			8:30 - 8:45	14	0	0	0	2	0
		7	7:45 - 8:00	13	0	0	0	0	0
			8:00 - 8:15	28	1	0	0	0	0
			8:15 - 8:30	23	4	0	0	0	0
			8:30 - 8:45	26	2	0	0	1	0
		8	7:45 - 8:00	10	0	0	0	1	0
			8:00 - 8:15	3	0	0	0	0	0
			8:15 - 8:30	12	0	0	0	0	0
			8:30 - 8:45	11	0	0	0	0	1
		9	7:45 - 8:00	0	0	0	0	0	0
			8:00 - 8:15	0	0	0	0	0	0
			8:15 - 8:30	0	0	0	0	0	0
			8:30 - 8:45	3	0	0	0	0	0

Data	Intersecção	Movimento	Período horário	CATEGORIA DE VEÍCULOS					
				V. Ligeiro	Motociclo	Ambulância	Caminioneta	Comercial	
								Ligeiro	Pesado
04-03-2008	 <p>332</p> <p>Rua de Dr Manuel Pereira da Silva</p>	1	7:45 - 8:00	27	0	0	0	3	0
			8:00 - 8:15	29	0	1	0	2	0
			8:15 - 8:30	33	0	0	1	0	0
			8:30 - 8:45	30	0	0	0	1	0
		2	7:45 - 8:00	5	0	1	0	0	0
			8:00 - 8:15	8	0	0	0	1	0
			8:15 - 8:30	7	0	0	0	1	0
			8:30 - 8:45	12	0	0	0	1	0
		3	7:45 - 8:00	3	0	0	0	0	0
			8:00 - 8:15	0	0	0	0	0	0
			8:15 - 8:30	1	0	0	0	0	0
			8:30 - 8:45	4	0	0	0	0	0
		4	7:45 - 8:00	67	2	3	0	6	3
			8:00 - 8:15	170	0	1	2	0	1
			8:15 - 8:30	145	2	0	1	0	0
			8:30 - 8:45	18	1	5	1	3	0
		5	7:45 - 8:00	2	0	0	0	0	0
			8:00 - 8:15	2	0	0	0	0	0
			8:15 - 8:30	0	0	0	0	0	0
			8:30 - 8:45	0	0	0	0	0	0
		6	7:45 - 8:00	40	2	1	1	2	0
			8:00 - 8:15	79	0	0	2	3	0
			8:15 - 8:30	134	0	0	0	6	0
			8:30 - 8:45	57	0	0	0	6	0
		7	7:45 - 8:00	8	0	0	0	0	0
			8:00 - 8:15	5	0	0	0	0	0
			8:15 - 8:30	0	0	0	0	0	0
			8:30 - 8:45	2	0	0	0	1	0
		8	7:45 - 8:00	65	0	6	0	1	0
			8:00 - 8:15	84	0	0	0	0	0
			8:15 - 8:30	54	0	1	0	0	0
			8:30 - 8:45	41	0	0	0	0	0
11-03-2008	 <p>363</p> <p>Rua de Dr Roberto Faria</p> <p>Rua Adol Faria da Silva</p> <p>Rua de Dr Manuel Lages</p>	1	7:45 - 8:00	0	0	0	0	0	0
			8:00 - 8:15	4	0	0	0	1	0
			8:15 - 8:30	13	0	0	0	0	0
			8:30 - 8:45	11	0	0	0	0	0
		2	7:45 - 8:00	7	0	0	0	1	0
			8:00 - 8:15	10	0	0	0	3	0
			8:15 - 8:30	11	0	0	0	0	0
			8:30 - 8:45	6	0	0	0	0	0
		3	7:45 - 8:00	58	0	0	0	2	0
			8:00 - 8:15	87	0	1	0	4	0
			8:15 - 8:30	107	0	2	0	2	1
			8:30 - 8:45	110	2	1	1	1	1
		4	7:45 - 8:00	27	0	1	0	1	0
			8:00 - 8:15	31	0	1	0	1	0
			8:15 - 8:30	33	0	0	0	3	0
			8:30 - 8:45	21	0	1	0	0	0

Data	Intersecção	Movimento	Período horário	CATEGORIA DE VEÍCULOS					
				V. Leveiro	Motociclo	Ambulância	Caminhoneira	Comercial	
								Leveiro	Pesado
11-03-2008	<p>363</p>	5	7:45 - 8:00	15	0	1	7	1	0
			8:00 - 8:15	45	0	0	5	2	0
			8:15 - 8:30	100	0	0	3	0	0
			8:30 - 8:45	66	0	0	3	1	0
		6	7:45 - 8:00	10	0	0	0	1	0
			8:00 - 8:15	10	0	0	0	0	0
			8:15 - 8:30	18	0	0	0	0	0
			8:30 - 8:45	21	0	0	0	3	0
		7	7:45 - 8:00	4	0	0	0	0	0
			8:00 - 8:15	4	0	0	0	2	0
			8:15 - 8:30	4	0	0	0	2	0
			8:30 - 8:45	8	0	0	0	1	0
8	7:45 - 8:00	1	0	0	0	3	0		
	8:00 - 8:15	2	0	0	0	0	0		
	8:15 - 8:30	2	0	0	0	2	0		
	8:30 - 8:45	3	0	0	0	0	0		
9	7:45 - 8:00	0	0	0	0	0	0		
	8:00 - 8:15	0	0	0	0	0	0		
	8:15 - 8:30	1	0	0	0	0	0		
	8:30 - 8:45	0	0	0	0	0	0		
10	7:45 - 8:00	34	0	0	0	2	0		
	8:00 - 8:15	74	0	2	1	3	0		
	8:15 - 8:30	87	0	1	1	1	0		
	8:30 - 8:45	110	0	1	0	1	0		
11	7:45 - 8:00	2	0	0	0	0	0		
	8:00 - 8:15	6	0	0	0	0	0		
	8:15 - 8:30	8	0	0	0	0	0		
	8:30 - 8:45	2	0	0	0	2	0		
12	7:45 - 8:00	1	0	0	0	1	0		
	8:00 - 8:15	2	0	0	0	2	0		
	8:15 - 8:30	8	0	0	0	0	0		
	8:30 - 8:45	9	0	0	0	0	0		
04-03-2008	<p>403</p> <p>Rua Doutor Roberto Frias</p>	1	7:45 - 8:00	94	1	8	1	4	0
			8:00 - 8:15	140	1	3	0	6	0
			8:15 - 8:30	109	1	4	0	2	0
			8:30 - 8:45	111	1	2	0	5	0
		2	7:45 - 8:00	87	0	0	3	2	0
			8:00 - 8:15	97	0	3	2	5	0
			8:15 - 8:30	101	0	1	1	1	0
			8:30 - 8:45	106	0	0	1	1	0
		3	7:45 - 8:00	123	2	7	0	4	1
			8:00 - 8:15	47	0	6	4	5	2
			8:15 - 8:30	45	-1	4	3	12	1
			8:30 - 8:45	130	0	10	0	0	2
		4	7:45 - 8:00	103	0	1	3	1	1
			8:00 - 8:15	75	0	1	4	2	0
			8:15 - 8:30	84	2	2	2	1	0
			8:30 - 8:45	99	0	1	4	2	0

Data	Intersecção	Movimento	Período horário	CATEGORIA DE VEÍCULOS					
				V. Ligeiro	Motociclo	Ambulância	Camioneta	Comercial	
								Ligeiro	Pesado
04-03-2008	<p>424</p> <p>Rua Doutor Roberto Frias</p> <p>Via Estruturante do Pólo II</p>	1	7:45 - 8:00	65	0	0	0	1	0
			8:00 - 8:15	125	0	0	0	0	0
			8:15 - 8:30	65	4	0	0	1	0
			8:30 - 8:45	102	0	0	0	1	0
		2	7:45 - 8:00	45	0	0	0	2	1
			8:00 - 8:15	70	0	0	0	0	0
			8:15 - 8:30	90	0	0	1	0	0
			8:30 - 8:45	54	0	0	0	1	0
		3	7:45 - 8:00	100	0	0	1	1	1
			8:00 - 8:15	73	0	1	1	1	0
			8:15 - 8:30	82	2	2	0	1	0
			8:30 - 8:45	97	0	1	2	2	0
		4	7:45 - 8:00	217	3	15	1	8	1
			8:00 - 8:15	187	1	9	4	11	2
			8:15 - 8:30	154	0	8	3	14	1
			8:30 - 8:45	241	1	12	0	5	2
04-03-2008	<p>449</p> <p>Rua Dr. Plácido da Costa</p> <p>Rua Dr. Roberto Frias</p>	1	7:45 - 8:00	162	2	2	1	3	1
			8:00 - 8:15	130	0	4	4	9	2
			8:15 - 8:30	126	1	1	2	13	1
			8:30 - 8:45	173	0	2	1	5	2
		2	7:45 - 8:00	155	1	13	1	6	1
			8:00 - 8:15	130	1	6	1	3	0
			8:15 - 8:30	110	0	9	1	2	0
			8:30 - 8:45	165	1	11	1	2	0
		3	7:45 - 8:00	3	0	1	2	0	0
			8:00 - 8:15	2	0	0	3	1	0
			8:15 - 8:30	2	0	0	2	0	0
			8:30 - 8:45	2	0	0	2	0	0
		4	7:45 - 8:00	1	0	1	0	0	0
			8:00 - 8:15	3	0	3	0	0	0
			8:15 - 8:30	4	0	9	0	0	0
			8:30 - 8:45	3	0	2	0	0	0
06-03-2008	<p>482</p> <p>Rua do Mestre Guilherme Camarinha</p> <p>Circunvalação</p>	1	7:45 - 8:00	6	0	0	0	1	1
			8:00 - 8:15	7	0	0	0	2	0
			8:15 - 8:30	11	0	0	0	0	0
			8:30 - 8:45	10	0	0	0	0	0
		2	7:45 - 8:00	80	0	0	0	4	0
			8:00 - 8:15	74	0	0	0	4	0
			8:15 - 8:30	93	0	0	0	6	0
			8:30 - 8:45	79	0	0	0	4	0
		3	7:45 - 8:00	288	11	0	10	17	0
			8:00 - 8:15	257	1	2	6	17	3
			8:15 - 8:30	298	3	3	7	17	2
			8:30 - 8:45	322	3	3	4	15	0

Data	Intersecção	Movimento	Período horário	CATEGORIA DE VEÍCULOS					
				V. Ligeiro	Motociclo	Ambulância	Camioneta	Comercial	
								Ligeiro	Pesado
04-03-2008	563 	1	7:45 - 8:00	0	0	0	0	0	0
			8:00 - 8:15	0	0	0	0	0	0
			8:15 - 8:30	0	0	0	0	0	0
			8:30 - 8:45	0	0	0	0	0	0
		2	7:45 - 8:00	18	0	0	0	1	0
			8:00 - 8:15	30	1	0	0	0	0
			8:15 - 8:30	46	0	0	0	1	0
			8:30 - 8:45	23	0	0	0	1	0
04-03-2008	661 	1	7:45 - 8:00	38	0	1	0	4	0
			8:00 - 8:15	40	0	1	0	1	0
			8:15 - 8:30	30	0	0	0	3	0
			8:30 - 8:45	39	0	0	0	8	0
		2	7:45 - 8:00	82	0	0	0	5	0
			8:00 - 8:15	64	1	0	0	3	0
			8:15 - 8:30	68	0	0	0	2	0
			8:30 - 8:45	88	0	0	0	1	0
		3	7:45 - 8:00	36	0	1	0	9	0
			8:00 - 8:15	33	0	0	0	5	0
			8:15 - 8:30	39	0	0	0	1	0
			8:30 - 8:45	55	0	0	0	5	0
		4	7:45 - 8:00	74	0	2	1	3	0
			8:00 - 8:15	67	0	1	0	1	0
			8:15 - 8:30	54	0	2	4	4	0
			8:30 - 8:45	56	0	1	0	2	0
		5	7:45 - 8:00	53	0	1	0	1	0
			8:00 - 8:15	43	0	3	0	0	0
			8:15 - 8:30	55	0	1	0	0	0
			8:30 - 8:45	34	0	1	0	0	0
		6	7:45 - 8:00	16	2	2	5	0	2
			8:00 - 8:15	17	0	5	2	0	0
			8:15 - 8:30	1	0	6	1	0	1
			8:30 - 8:45	13	0	4	1	0	0
05-03-2008	677 	1	7:45 - 8:00	98	1	5	1	4	0
			8:00 - 8:15	76	0	1	0	3	0
			8:15 - 8:30	75	0	4	4	2	0
			8:30 - 8:45	72	0	2	0	4	0
		2	7:45 - 8:00	49	0	0	0	5	0
			8:00 - 8:15	39	0	0	0	3	0
			8:15 - 8:30	34	2	1	0	6	0
			8:30 - 8:45	46	2	1	0	5	0
		3	7:45 - 8:00	55	0	1	0	2	0
			8:00 - 8:15	46	0	0	0	0	0
			8:15 - 8:30	48	0	0	0	3	0
			8:30 - 8:45	51	0	0	0	0	0
		4	7:45 - 8:00	56	0	1	0	0	0
			8:00 - 8:15	54	0	1	0	3	0
			8:15 - 8:30	66	2	0	0	2	0
			8:30 - 8:45	79	0	1	0	4	0

Data	Intersecção	Movimento	Período horário	CATEGORIA DE VEÍCULOS					
				V. Ligeiro	Motociclo	Ambulância	Camioneta	Comercial	
								Ligeiro	Pesado
05-03-2008	<p>677</p> <p>Rua de S. Tomé</p> <p>Rua Conde de Avranches</p>	5	7:45 - 8:00	17	0	0	0	1	0
			8:00 - 8:15	18	0	0	0	1	0
			8:15 - 8:30	36	0	1	0	1	0
			8:30 - 8:45	20	0	1	0	1	0
		6	7:45 - 8:00	4	0	0	0	8	1
			8:00 - 8:15	0	0	0	0	8	1
			8:15 - 8:30	10	0	0	0	7	0
			8:30 - 8:45	0	0	0	0	0	0
06-03-2008	<p>749</p> <p>Rua da Agra do Amial</p> <p>Rua Dionísio dos Santos Silva</p>	1	7:45 - 8:00	96	1	3	1	3	1
			8:00 - 8:15	129	1	8	7	5	0
			8:15 - 8:30	146	1	5	2	4	1
			8:30 - 8:45	211	0	3	3	10	1
		2	7:45 - 8:00	8	0	0	0	2	0
			8:00 - 8:15	13	0	0	0	0	0
			8:15 - 8:30	5	0	0	0	2	1
			8:30 - 8:45	22	1	0	0	1	0
		3	7:45 - 8:00	51	0	0	0	0	0
			8:00 - 8:15	71	0	0	0	0	0
			8:15 - 8:30	111	0	0	0	0	0
			8:30 - 8:45	97	0	1	0	7	0
		4	7:45 - 8:00	22	0	0	0	1	0
			8:00 - 8:15	35	0	0	0	1	0
			8:15 - 8:30	62	0	1	0	0	0
			8:30 - 8:45	46	0	0	0	3	0
		5	7:45 - 8:00	11	1	3	4	3	0
			8:00 - 8:15	6	1	3	2	3	0
			8:15 - 8:30	6	2	2	2	2	0
			8:30 - 8:45	12	0	0	0	0	0
		6	7:45 - 8:00	56	0	0	3	1	0
			8:00 - 8:15	39	0	1	1	0	0
			8:15 - 8:30	35	1	0	0	0	0
			8:30 - 8:45	19	0	0	0	0	0
05-03-2008	<p>759</p> <p>Rua António Bernardino Almeida</p> <p>Rua Dionísio dos Santos Silva</p>	1	7:45 - 8:00	133	0	2	1	4	0
			8:00 - 8:15	96	0	3	2	6	0
			8:15 - 8:30	112	1	3	3	6	0
			8:30 - 8:45	122	1	0	0	2	0
		2	7:45 - 8:00	102	1	3	4	3	0
			8:00 - 8:15	99	1	3	2	3	0
			8:15 - 8:30	119	2	2	2	2	0
			8:30 - 8:45	140	0	0	0	0	0
		3	7:45 - 8:00	11	0	0	0	1	0
			8:00 - 8:15	6	0	0	0	0	0
			8:15 - 8:30	6	0	0	0	0	0
			8:30 - 8:45	12	0	0	0	0	0
		4	7:45 - 8:00	72	0	0	0	2	0
			8:00 - 8:15	58	0	1	0	0	0
			8:15 - 8:30	80	0	1	0	0	0
			8:30 - 8:45	87	0	0	2	3	0

Data	Intersecção	Movimento	Período horário	CATEGORIA DE VEÍCULOS					
				V. Ligeiro	Motociclo	Ambulância	Camioneta	Comercial	
								Ligeiro	Pesado
05-03-2008	<div style="text-align: center;">899</div> <p style="text-align: center;">Circunvalação</p> <p style="text-align: center;">Rua de S. Tomé</p>	1	7:45 - 8:00	141	6	0	0	6	1
			8:00 - 8:15	192	2	0	2	24	0
			8:15 - 8:30	231	3	0	0	26	0
			8:30 - 8:45	212	3	0	0	25	1
		2	7:45 - 8:00	70	0	0	0	6	1
			8:00 - 8:15	58	0	0	0	6	1
			8:15 - 8:30	73	0	0	0	7	0
			8:30 - 8:45	44	0	0	0	2	0
		3	7:45 - 8:00	211	2	3	3	10	0
			8:00 - 8:15	240	2	2	1	3	0
			8:15 - 8:30	241	1	1	1	8	2
			8:30 - 8:45	222	2	1	4	6	2
		4	7:45 - 8:00	26	0	1	0	2	0
			8:00 - 8:15	18	0	0	0	5	0
			8:15 - 8:30	24	0	0	0	2	0
			8:30 - 8:45	26	0	0	0	1	0
		5	7:45 - 8:00	18	0	0	0	3	0
			8:00 - 8:15	45	0	0	0	0	0
			8:15 - 8:30	43	0	1	0	2	0
			8:30 - 8:45	40	2	2	0	2	0
		6	7:45 - 8:00	55	1	0	0	1	0
			8:00 - 8:15	55	1	1	0	1	0
			8:15 - 8:30	73	0	0	3	2	0
			8:30 - 8:45	54	0	1	0	0	0

## **TABELA 2**

Recolha de dados em Parques (2006).

Parque	Período horário	Categoria De Veículos					
		Veículo Ligeiro	Motociclo	Ambulância	Camioneta	Comercial	
						Ligeiro	Pesado
Campus SJ1 (entradas)	7:45 - 8:00	16	0	0	0	2	0
	8:00 - 8:15	14	0	0	0	2	0
	8:15 - 8:30	17	0	0	0	1	0
	8:30 - 8:45	16	0	0	0	1	0
Campus SJ2 (saídas)	7:45 - 8:00	5	0	0	0	0	0
	8:00 - 8:15	9	0	0	0	0	0
	8:15 - 8:30	8	0	0	0	0	0
	8:30 - 8:45	6	0	0	0	1	0
Campus SJ3 (entradas)	7:45 - 8:00	16	0	0	0	1	0
	8:00 - 8:15	13	0	0	0	2	0
	8:15 - 8:30	17	0	0	0	1	0
	8:30 - 8:45	17	0	0	0	0	0
Campus SJ3 (saídas)	7:45 - 8:00	5	0	0	0	0	0
	8:00 - 8:15	9	0	0	0	0	0
	8:15 - 8:30	9	0	0	0	0	0
	8:30 - 8:45	6	0	0	0	0	0
Católica Biotecnologia (entradas)	7:45 - 8:00	36	0	0	0	3	0
	8:00 - 8:15	48	0	0	0	4	0
	8:15 - 8:30	51	0	0	0	4	0
	8:30 - 8:45	42	0	0	1	4	0
Católica Biotecnologia (saídas)	7:45 - 8:00	10	0	0	0	0	0
	8:00 - 8:15	15	0	0	0	0	0
	8:15 - 8:30	11	0	0	0	0	0
	8:30 - 8:45	14	0	0	0	0	0
Enfermagem (entradas)	7:45 - 8:00	15	0	0	0	1	0
	8:00 - 8:15	12	0	0	0	2	0
	8:15 - 8:30	11	0	0	0	2	0
	8:30 - 8:45	19	0	0	0	1	0
Enfermagem (saídas)	7:45 - 8:00	19	0	0	0	0	0
	8:00 - 8:15	29	0	0	0	0	0
	8:15 - 8:30	27	0	0	0	0	0
	8:30 - 8:45	25	0	0	0	0	0

ESE 1 (entradas)	7:45 - 8:00	6	0	0	0	0	0
	8:00 - 8:15	34	0	0	0	2	0
	8:15 - 8:30	31	0	0	0	0	0
	8:30 - 8:45	44	0	0	0	0	0
ESE 1 (saídas)	7:45 - 8:00	0	0	0	0	1	0
	8:00 - 8:15	1	0	0	0	0	0
	8:15 - 8:30	1	0	0	0	0	0
	8:30 - 8:45	0	0	0	0	1	0
ESE 2 (entradas)	7:45 - 8:00	15	0	0	0	1	0
	8:00 - 8:15	34	0	0	0	2	0
	8:15 - 8:30	31	0	0	0	0	0
	8:30 - 8:45	44	0	0	0	0	0
ESE 2 (saídas)	7:45 - 8:00	0	0	0	0	0	0
	8:00 - 8:15	1	0	0	0	0	0
	8:15 - 8:30	0	0	0	0	0	0
	8:30 - 8:45	0	0	0	0	1	0
FCDEF 1 (entrada)	7:45 - 8:00	57	0	0	0	3	0
	8:00 - 8:15	68	0	0	0	4	0
	8:15 - 8:30	45	0	0	0	2	0
	8:30 - 8:45	71	0	0	0	0	0
FCDEF 1 (saída)	7:45 - 8:00	10	0	0	0	0	0
	8:00 - 8:15	16	0	0	0	0	0
	8:15 - 8:30	17	0	0	0	0	0
	8:30 - 8:45	1	0	0	0	1	0
FCDEF 2 (entrada)	7:45 - 8:00	57	0	0	0	3	0
	8:00 - 8:15	8	0	0	0	4	0
	8:15 - 8:30	5	0	0	0	2	0
	8:30 - 8:45	7	0	0	0	0	0
FCDEF 2 (saída)	7:45 - 8:00	51	0	0	0	0	0
	8:00 - 8:15	16	0	0	0	0	0
	8:15 - 8:30	17	0	0	0	0	0
	8:30 - 8:45	12	0	0	0	1	0
FEP (entradas)	7:45 - 8:00	30	0	0	0	0	0
	8:00 - 8:15	95	0	0	0	0	0
	8:15 - 8:30	35	0	0	0	0	0
	8:30 - 8:45	63	0	0	0	0	0

FEP (saídas)	7:45 - 8:00	0	0	0	0	0	0
	8:00 - 8:15	0	0	0	0	0	0
	8:15 - 8:30	0	0	0	0	0	0
	8:30 - 8:45	0	0	0	0	0	0
HSJ 1 (entrada)	7:45 - 8:00	23	0	0	0	0	0
	8:00 - 8:15	17	0	0	0	0	0
	8:15 - 8:30	1	0	0	0	0	0
	8:30 - 8:45	7	0	0	0	0	0
HSJ 1 (saída)	7:45 - 8:00	5	0	0	0	1	0
	8:00 - 8:15	22	0	0	0	0	0
	8:15 - 8:30	19	0	0	0	0	0
	8:30 - 8:45	26	0	0	0	0	0
HSJ 2 (entradas)	7:45 - 8:00	98	0	0	0	0	0
	8:00 - 8:15	54	0	0	0	0	0
	8:15 - 8:30	58	0	0	0	0	0
	8:30 - 8:45	42	0	0	0	0	0
HSJ 2 (saídas)	7:45 - 8:00	30	0	0	0	1	0
	8:00 - 8:15	22	0	0	0	0	0
	8:15 - 8:30	40	0	0	0	0	0
	8:30 - 8:45	30	0	0	0	0	0
HSJ 3 (entradas)	7:45 - 8:00	15	0	0	0	1	0
	8:00 - 8:15	34	0	0	0	2	0
	8:15 - 8:30	31	0	0	0	0	0
	8:30 - 8:45	44	0	0	0	0	0
HSJ 3 (saídas)	7:45 - 8:00	0	0	0	0	0	0
	8:00 - 8:15	1	0	0	0	0	0
	8:15 - 8:30	0	0	0	0	0	0
	8:30 - 8:45	0	0	0	0	1	0
HSJ 4 (entradas)	7:45 - 8:00	78	0	0	0	0	0
	8:00 - 8:15	44	0	0	0	8	0
	8:15 - 8:30	74	0	0	0	2	0
	8:30 - 8:45	36	0	0	0	2	0
HSJ 4 (saídas)	7:45 - 8:00	10	0	0	0	4	0
	8:00 - 8:15	24	0	0	0	0	0
	8:15 - 8:30	25	0	0	0	0	0
	8:30 - 8:45	18	0	0	0	1	0

HSJ Saída	7:45 - 8:00	10	0	0	0	2	0
	8:00 - 8:15	8	0	0	0	0	0
	8:15 - 8:30	9	0	0	0	0	0
	8:30 - 8:45	6	0	0	0	1	0
IPATIMUP (entradas)	7:45 - 8:00	7	0	0	0	0	0
	8:00 - 8:15	9	0	0	0	0	0
	8:15 - 8:30	12	0	0	0	0	0
	8:30 - 8:45	13	0	0	0	0	0
IPATIMUP (saídas)	7:45 - 8:00	1	0	0	0	0	0
	8:00 - 8:15	2	0	1	0	0	0
	8:15 - 8:30	1	0	1	0	0	0
	8:30 - 8:45	0	0	0	0	0	0
IPO (entradas)	7:45 - 8:00	39	0	0	0	1	0
	8:00 - 8:15	39	0	0	0	2	0
	8:15 - 8:30	45	0	0	0	2	0
	8:30 - 8:45	36	0	0	0	1	0
IPO (saídas)	7:45 - 8:00	7	0	0	0	0	0
	8:00 - 8:15	7	0	0	0	0	0
	8:15 - 8:30	16	0	0	0	0	0
	8:30 - 8:45	7	0	0	0	0	0
Portugalense (entradas)	7:45 - 8:00	137	2	1	5	7	0
	8:00 - 8:15	158	1	1	1	20	0
	8:15 - 8:30	154	1	2	1	7	0
	8:30 - 8:45	166	0	0	0	15	1
Portugalense (saídas)	7:45 - 8:00	0	0	0	0	0	0
	8:00 - 8:15	0	0	0	0	0	0
	8:15 - 8:30	0	0	0	0	0	0
	8:30 - 8:45	0	0	0	0	0	0
Público (entrada)	7:45 - 8:00	21	0	0	0	1	0
	8:00 - 8:15	15	0	0	0	2	0
	8:15 - 8:30	4	0	0	0	1	0
	8:30 - 8:45	7	0	0	0	1	0
Público (saída)	7:45 - 8:00	5	0	0	0	0	1
	8:00 - 8:15	23	0	0	0	0	1
	8:15 - 8:30	13	0	0	1	0	1
	8:30 - 8:45	25	0	0	1	0	2



### **TABELA 3**

Recolha de dados em parques (2008).

Parque	Período horário	Categoria de Veículos					
		Veículo Ligeiro	Motociclo	Ambulância	Camioneta	Comercial	
						Ligeiro	Pesado
FPP (entradas)	7:45 - 8:00	13	0	0	0	0	0
	8:00 - 8:15	14	0	0	0	0	0
	8:15 - 8:30	13	0	0	0	0	0
	8:30 - 8:45	12	0	0	0	0	0
FPP (saídas)	7:45 - 8:00	0	0	0	0	0	0
	8:00 - 8:15	0	0	0	0	0	0
	8:15 - 8:30	0	0	0	0	0	0
	8:30 - 8:45	0	0	0	0	0	0
ISEP 1 (entradas)	7:45 - 8:00	52	0	0	0	0	0
	8:00 - 8:15	69	0	0	0	1	0
	8:15 - 8:30	38	0	0	0	1	0
	8:30 - 8:45	48	0	0	0	5	0
ISEP 1 (saídas)	7:45 - 8:00	0	0	0	0	0	0
	8:00 - 8:15	2	0	0	0	0	0
	8:15 - 8:30	1	0	0	0	0	0
	8:30 - 8:45	2	0	0	0	1	0
ISEP 2 (entradas)	7:45 - 8:00	21	0	0	0	0	0
	8:00 - 8:15	9	0	0	0	0	0
	8:15 - 8:30	6	0	0	0	0	0
	8:30 - 8:45	11	0	0	0	0	0
ISEP 2 (saídas)	7:45 - 8:00	0	0	0	0	0	0
	8:00 - 8:15	0	0	0	0	0	0
	8:15 - 8:30	1	0	0	0	0	0
	8:30 - 8:45	3	0	0	0	0	0
FMDUP (entradas)	7:45 - 8:00	2	0	0	0	0	0
	8:00 - 8:15	5	0	0	0	0	0
	8:15 - 8:30	11	0	0	0	0	0
	8:30 - 8:45	5	0	0	0	0	0

	7:45 - 8:00	1	0	0	0	0	0
FMDUP (saídas)	8:00 - 8:15	1	0	0	0	0	0
	8:15 - 8:30	1	0	0	0	0	0
	8:30 - 8:45	0	0	0	0	0	0



## **ANEXO 2**

### **Tempos de Viagem**





Detalhe dos valores recolhidos no Percurso 2

Percurso 2 Hora de início 7:48h 17-04-2008 1			
Secção	Tempo Marcha	Tempo Parado	Tempo Total
L	00:57,90	00:00,00	00:57,90
M	00:26,86	00:00,00	00:26,86
G	00:34,27	00:10,29	00:44,56
F	00:09,00	05:10,18	05:19,18
E	00:31,50	00:00,00	00:31,50
N	00:17,00	00:00,00	00:17,00
O	01:13,00	00:00,00	01:13,00
P	00:47,41	00:33,23	01:20,64
Q	00:18,89	01:44,72	02:03,61
			12:54,25

Percurso 2 Hora de início 7:51h 17-04-2008 2			
Secção	Tempo Marcha	Tempo Parado	Tempo Total
L	00:39,77	00:00,00	00:39,77
M	00:26,23	00:00,00	00:26,23
G	00:33,10	00:00,00	00:33,10
F	00:18,77	02:54,88	03:13,65
E	00:10,10	00:24,00	00:34,10
N	00:09,80	00:00,00	00:09,80
O	00:41,93	00:41,07	01:23,00
P	00:42,89	00:00,00	00:42,89
Q	00:20,76	01:34,09	01:54,85
			09:37,39

Percurso 2 Hora de início 7:54h 17-04-2008 3			
Secção	Tempo Marcha	Tempo Parado	Tempo Total
L	00:44,89	00:00,00	00:44,89
M	00:24,58	00:00,00	00:24,58
G	00:37,11	00:00,00	00:37,11
F	00:26,11	03:23,72	03:49,83
E	00:26,40	00:00,00	00:26,40
N	00:11,32	00:00,00	00:11,32
O	00:55,01	00:00,00	00:55,01
P	00:41,27	00:00,00	00:41,27
Q	00:19,29	00:09,04	00:28,33
			08:18,74

Nota: Percursos excluído devido aos valores elevados

Percurso 2 Hora de início 7:58h 17-04-2008 4			
Secção	Tempo Marcha	Tempo Parado	Tempo Total
L	00:39,40	00:00,00	00:39,40
M	00:19,64	00:00,00	00:19,64
G	00:36,43	00:00,00	00:36,43
F	00:23,40	03:13,14	03:36,54
E	00:27,26	00:00,00	00:27,26
N	00:08,73	00:00,00	00:08,73
O	00:42,52	01:19,17	02:01,69
P	00:43,19	01:06,29	01:49,48
Q	00:39,97	00:53,35	01:33,32
			11:12,49

Percurso 2 Hora de início 8:22h 15-04-2008 5			
Secção	Tempo Marcha	Tempo Parado	Tempo Total
L	00:47,42	00:15,14	01:02,56
M	00:22,09	00:00,00	00:22,09
G	00:27,62	00:00,00	00:27,62
F	00:38,98	03:02,04	03:41,02
E	00:47,56	00:00,00	00:47,56
N	00:05,23	00:00,00	00:05,23
O	00:31,96	01:36,20	02:08,16
P	00:52,99	00:12,46	01:05,45
Q	00:35,21	01:09,47	01:44,68
			11:24,37

Percurso 2 Hora de início 8:33h 15-04-2008 6			
Secção	Tempo Marcha	Tempo Parado	Tempo Total
L	01:18,51	00:13,95	01:32,46
M	00:04,98	00:00,00	00:04,98
G	00:30,91	00:00,00	00:30,91
F	00:33,89	03:35,87	04:09,76
E	00:33,92	00:23,50	00:57,42
N	00:08,54	00:00,00	00:08,54
O	00:44,07	00:25,85	01:09,92
P	00:46,25	00:18,60	01:04,85
Q	00:20,55	00:00,00	00:20,55
			09:59,39

Detalhe dos valores recolhidos no Percurso 3

Percurso 3 Hora de início 7:48h 17-04-2008 1			
Secção	Tempo Marcha	Tempo Parado	Tempo Total
B	00:21,05	00:00,00	00:21,05
C	00:59,12	05:58,04	06:57,16
D	00:06,79	01:04,66	01:11,45
E	01:09,41	00:00,00	01:09,41
N	00:07,18	00:00,00	00:07,18
O	00:45,03	00:00,00	00:45,03
M	00:20,61	00:00,00	00:20,61
G	00:14,17	00:00,00	00:14,17
H	00:11,80	00:00,00	00:11,80
I	01:13,70	00:15,55	01:29,25
J	00:55,42	00:00,00	00:55,42

Percurso 3 Hora de início 8:07h 17-04-2008 2			
Secção	Tempo Marcha	Tempo Parado	Tempo Total
B	00:25,37	00:05,91	00:31,28
C	01:07,92	01:26,94	02:34,86
D	00:11,03	00:56,16	01:07,19
E	01:19,82	00:05,97	01:25,79
N	00:07,34	00:00,00	00:07,34
O	00:44,82	00:00,00	00:44,82
M	00:22,45	00:00,00	00:22,45
G	00:14,49	00:00,00	00:14,49
H	00:12,02	00:00,00	00:12,02
I	01:46,11	00:39,28	02:25,39
J	00:43,48	00:00,00	00:43,48

Percurso 3 Hora de início 8:25h 17-04-2008 3			
Secção	Tempo Marcha	Tempo Parado	Tempo Total
B	00:19,25	00:00,00	00:19,25
C	00:47,22	01:06,30	01:53,52
D	00:13,15	00:00,00	00:13,15
E	00:57,68	00:18,03	01:15,71
N	00:08,60	00:00,00	00:08,60
O	00:43,54	00:22,72	01:06,26
M	00:19,58	00:00,00	00:19,58
G	00:09,69	00:00,00	00:09,69
H	00:18,51	00:00,00	00:18,51
I	01:23,29	00:03,50	01:26,79
J	00:51,6	00:26,6	01:18,22

Nota: Percursos excluído devido aos valores elevados

Percurso 3 Hora de início 8:38h 17-04-2008 4			
Secção	Tempo Marcha	Tempo Parado	Tempo Total
B	00:16,64	00:00,00	00:16,64
C	00:38,54	00:31,37	01:09,91
D	00:11,64	00:00,00	00:11,64
E	00:41,30	00:11,82	00:53,12
N	00:07,70	00:00,00	00:07,70
O	00:45,76	00:00,00	00:45,76
M	00:17,89	00:00,00	00:17,89
G	00:12,44	00:00,00	00:12,44
H	00:13,36	00:00,00	00:13,36
I	01:16,79	00:43,53	02:00,32
J	00:55,44	00:37,62	01:33,06

Percurso 3 Hora de início 7:45h 22-04-2008 5			
Secção	Tempo Marcha	Tempo Parado	Tempo Total
B	00:30,23	00:00,00	00:30,23
C	00:40,39	00:15,90	00:56,29
D	00:14,46	00:00,00	00:14,46
E	00:40,03	00:08,09	00:48,12
N	00:08,07	00:00,00	00:08,07
O	00:48,06	00:17,30	01:05,36
M	00:22,02	00:00,00	00:22,02
G	00:15,02	00:00,00	00:15,02
H	00:12,42	00:00,00	00:12,42
I	01:18,73	00:21,88	01:40,61
J	00:55,84	00:30,81	01:26,65

Percurso 3 Hora de início 8:05h 15-04-2008 6			
Secção	Tempo Marcha	Tempo Parado	Tempo Total
B	00:23,18	00:00,00	00:23,18
C	00:42,30	00:40,74	01:23,04
D	00:16,32	00:00,00	00:16,32
E	00:22,97	00:00,00	00:22,97
N	00:09,95	00:00,00	00:09,95
O	00:58,29	00:28,82	01:27,11
M	00:23,26	00:00,00	00:23,26
G	00:17,68	00:00,00	00:17,68
H	00:13,42	00:00,00	00:13,42
I	01:22,36	00:50,18	02:12,54
J	00:56,0	00:19,5	01:15,51



## **ANEXO 3**

### **Rede da Asprela Codificada em AIMSUN**

Nesta secção é apresentada a codificação da rede da Asprela, através do programa informático de simulação AIMSUN. As imagens de fundo são ortofotomapas de 2004.

Algumas considerações para uma melhor interpretação:

- Os rectângulos amarelos são paragens de veículos de transporte público colectivo, do lado direito de circulação encontram-se os respectivos nomes das paragens segundo a designação dada pela respectiva entidade de exploração;

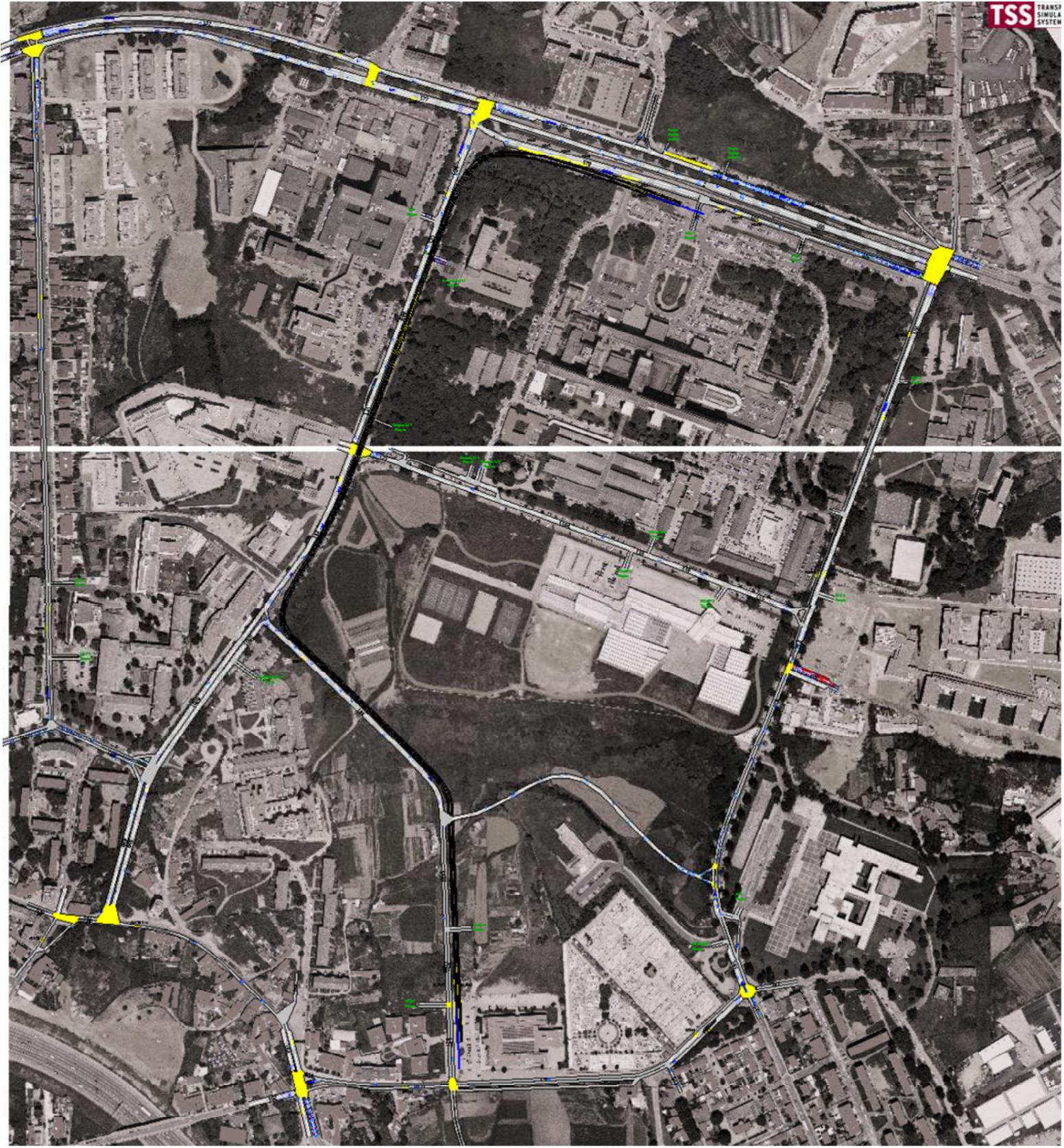
- Os nós podem estar representados a cinzento ou a amarelo. A cor amarela significa que se trata de uma “*yellow box*” logo que a paragem de veículos nessa intersecção é interdita;

- Os veículos são representados a cor azul, apresentando distintos formatos consoante a categoria a que pertencem;

Os parques de estacionamento considerados neste estudo estão designados a verde;

- As caixas azuis por vezes presentes nas secções são detectores. Os detectores podem estar presentes devido a existência de semáforos actuados ou simplesmente para realizarem a contagem de veículos caso se queira realizar estatísticas no AIMSUN;

- Juntos às intersecções sobre as secções pode-se encontrar a sinalização vertical ou a luminosa caso esta exista.





## **ANEXO 4**

### **Coeficiente de *Theil***



