



**FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**  
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

# **Avaliação do Efeito da Variação de Parâmetros de Calibração na Qualidade dos Resultados de Estudos de Simulação de Tráfego**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na Especialidade de Urbanismo, Transportes e Vias de Comunicação

**Autor**

**Miguel Ferreira Figueiredo**

**Orientadores**

**Professor Doutor Álvaro Jorge Maia Seco**

**Professora Doutora Ana Maria César Bastos Silva**

Esta dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor, não tendo sofrido correções após a defesa em provas públicas. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade pelo uso da informação apresentada.

**Coimbra, Outubro, 2013**

## AGRADECIMENTOS

A conclusão deste trabalho é o culminar de uma etapa muito importante na minha vida, pelo o que não poderia deixar de prestar aqui agradecimentos a algumas pessoas, cuja ajuda e colaboração, direta ou indiretamente, foi crucial para que fosse possível aqui chegar.

Começo por agradecer de uma forma especial ao Professor Doutor Álvaro Jorge Maia Seco e à Professora Doutora Ana Maria César Bastos Silva, Professores do Departamento de Engenharia Civil (DEC) da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra (FCTUC), pela orientação científica neste trabalho, pelo constante incentivo e disponibilidade, pelos importantes conhecimentos, tanto técnicos como metodológicos, que me transmitiram, e pela forma amigável com que sempre me receberam. É também a eles que devo grande parte da minha formação nas áreas de Engenharia de Tráfego e Transportes.

Um agradecimento muito grande aos meus pais e irmão pelo apoio incondicional, aconselhamento e compreensão que me deram ao longo destes anos do curso de Engenharia Civil, num percurso nem sempre fácil.

Um agradecimento aos excelentes amigos que me rodeiam, em especial aos que tive a felicidade de conhecer e partilhar vivências durante estes anos de curso em Coimbra, aos do 3º andar, aos da Benedita, e aos do BEST Coimbra.

Ao BEST Coimbra e às pessoas envolvidas, deixo o meu agradecimento por todas as experiências, alargamento de horizontes e desenvolvimento pessoal que, de uma forma ou de outra, me foram proporcionados.

Queria ainda deixar uma nota de agradecimento ao Eng.º Luís Vasconcelos do Instituto Politécnico de Viseu, pela importante ajuda técnica em pontos cruciais do desenvolvimento deste trabalho.

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do projeto de investigação EMSURE - Energy and Mobility for Sustainable Regions (CENTRO-07-0224-FEDER-002004) e do projeto AROUND – “Novos Instrumentos de Avaliação Operacional e Ambiental de Rotundas”, projeto de investigação financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia do Ministério da Educação e Ciência e pelo Orçamento do programa COMPETE - Programa Operacional Fatores de Competitividade na sua componente FEDER.

## RESUMO

A complexidade das redes rodoviárias e a necessidade crescente de se justificar de forma tecnicamente sustentada investimentos avultados nos sistemas de transportes, têm vindo a requerer o uso de ferramentas cada vez mais sofisticadas. As técnicas de simulação assentam na representação virtual das condições reais de circulação. A precisão dos resultados depende da capacidade do modelo representar a realidade, o que enfatiza a importância associada à fase de calibração onde se procura obter um grau de precisão adequado.

Esses trabalhos incidem na estimação dos valores a atribuir a um conjunto alargado de parâmetros associados ao comportamento do condutor e às características básicas das classes de veículos, procurando por aproximações sucessivas e com um nível de erro aceitável, ajustar os resultados estimados pelo modelo às observações reais.

Nesta linha de ação, o presente trabalho consistiu na realização de uma análise de sensibilidade para avaliação do impacto expectável na precisão dos resultados fornecidos por modelos de microssimulação de tráfego. A resposta dos modelos é testada para diversos tipos e níveis de erros associados à estimação de alguns parâmetros de calibração, procurando perceber a sua importância relativa.

A metodologia de abordagem baseou-se na introdução sistemática de diferentes erros nos parâmetros de calibração, de tipo e nível considerados típicos em processos de modelação de tráfego, embora em alguns casos usando também valores limite para melhor testar padrões nos resultados obtidos. Para o efeito procurou-se codificar/modelar um estudo de caso representativo de situações reais normais, potenciando a avaliação dos impactos desses erros ao nível da precisão dos resultados produzidos pelos modelos. Os trabalhos foram desenvolvidos tendo por base o uso do *software Aimsun*.

Dos resultados obtidos evidencia-se a relativa imprevisibilidade dos modelos responderem de forma expectável à introdução de erros, os resultados diferenciados para as análises com combinação de erros, assim como a diferente importância de cada parâmetro em diferentes situações. Foi ainda possível quantificar relações diferenciadas entre o valor dos erros introduzidos nos parâmetros e os erros nos resultados da modelação.

Palavras chave: *Aimsun*, microssimulação, calibração, parâmetros de calibração, erros.

## ABSTRACT

The complexity of road networks and the increasing need to justify large investments in transportation systems in a robust and technically supported way, have been demanding the use of more and more sophisticated tools. The simulation techniques comprise virtual representation of the real traffic conditions. Precision of results rely on the capacity of the model to represent the reality, which highlights the importance of the calibration process and the need for an adequate precision for each situation.

The development of these kind works focus on the estimation of values for a wide range of parameters, mostly related to the behavior of the driver and to the characteristics of each class of vehicles, and their adjustment and calibration to data obtained in real situations, through successive approximations until an acceptable error bar is achieved.

Within this framework, the present work consists in a sensitivity analysis of how the expected accuracy of the output of traffic microsimulation models can be affected by the type and degree of errors in the estimation of calibration parameters. The relevance and influence of each of these estimations is considered separately and their accuracy/precision requirements is analyzed

The methodological approach was based on the systematic introduction of errors in the various calibration parameters. The considered error values range were in accordance with the typical errors for traffic modeling processes; in some cases, extreme values were used instead, in order to enhance the search for patterns in the results. A representative case study for a real situation was used as a model, which enhanced the assessment of the impacts of these errors in the accuracy of the output results. *Aimsun* software was used for the simulations.

Results show some unpredictability of the response of the models to the introduction of errors, different results for the analyses that combined errors, as well the different importance of each parameter in each particular situation. It was possible to quantify the relations between the values of the errors introduced in the parameters and the errors in the modeling results.

Keywords: *Aimsun*, microsimulation, calibration, calibration parameters, errors.

## ÍNDICE

|   |      |
|---|------|
| AGRADECIMENTOS .....  | i    |
| RESUMO.....   | ii   |
| ABSTRACT .....  | iii  |
| SIMBOLOGIA .....  | vii  |
| ABREVIATURAS .....  | viii |
| GLOSSÁRIO.....  | ix   |
| 1. INTRODUÇÃO.....  | 1    |
| 1.1 Enquadramento / Importância do tema .....                         | 1    |
| 1.2 Objeto de estudo e objetivos .....                                | 3    |
| 1.3 Metodologia adotada.....  | 4    |
| 1.4 Estrutura da Dissertação .....                                    | 7    |
| 2. MODELOS DE SIMULAÇÃO.....  | 8    |
| 2.1 Introdução .....  | 8    |
| 2.2 Tipos de modelos e domínio privilegiado de aplicação.....         | 8    |
| 2.2.1 Modelos macroscópicos .....                                     | 9    |
| 2.2.2 Modelos microscópicos .....                                     | 10   |
| 2.2.3 Modelos mesoscópicos .....                                      | 11   |
| 2.2.4 Integração de modelos a vários níveis e modelos híbridos .....  | 11   |
| 2.3 A Aplicação Aimsun.....   | 12   |
| 2.3.1 Apresentação .....  | 12   |
| 2.3.2 O processo de simulação microscópica no Aimsun .....            | 13   |
| 2.3.3 Geração de veículos.....  | 14   |
| 2.3.4 Modelação do movimento dos veículos .....                       | 16   |
| 2.3.5 Relatividade dos agentes na modelação microscópica .....        | 16   |
| 2.3.6 O modelo Car-Following.....                                     | 17   |
| 2.3.7 O modelo <i>Lane-changing</i> .....                             | 20   |
| 2.3.8 O modelo <i>Gap Acceptance</i> para cedência de prioridade..... | 23   |

---

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 2.3.9 | Submodelos .....  | 24 |
| 2.4   | Considerações finais .....  | 26 |
| 3.    | PARAMETROS DE CALIBRAÇÃO .....  | 27 |
| 3.1   | Identificação dos principais parâmetros de calibração .....                       | 27 |
| 3.1.1 | Parâmetros relativos ao comportamento do condutor .....                           | 27 |
| 3.1.2 | Parâmetros relativos à dinâmica dos veículos .....                                | 31 |
| 3.1.3 | Parâmetros de perturbação dos comportamentos padrão do condutor .....             | 32 |
| 3.1.4 | Parâmetros relativos ao funcionamento da simulação e à recolha de resultados      | 34 |
| 3.2   | Avaliação do impacte dos parâmetros de calibração .....                           | 34 |
| 4.    | AVALIAÇÃO DO EFEITO DOS PARÂMETROS DE CALIBRAÇÃO NA QUALIDADE DOS RESULTADOS..... | 36 |
| 4.1   | Introdução .....  | 36 |
| 4.2   | Construção do modelo .....  | 36 |
| 4.2.1 | Escolha do modelo de estudo .....   | 36 |
| 4.2.2 | Recolha de dados de campo e construção do modelo no Aimsun.....                   | 37 |
| 4.2.3 | Calibração e validação do modelo.....   | 39 |
| 4.3   | Análise sistemática de erros de quantificação .....                               | 41 |
| 4.3.1 | Estudos com erros isolados.....   | 41 |
| 4.3.2 | Estudos com combinação de erros.....  | 42 |
| 4.3.3 | Listagem síntese dos casos de estudo .....  | 44 |
| 4.4   | Indicadores de desempenho .....   | 45 |
| 4.4.1 | Seleção inicial dos indicadores de desempenho .....                               | 45 |
| 4.4.2 | Análise preliminar dos indicadores de desempenho.....                             | 46 |
| 4.5   | Análise dos resultados.....   | 49 |
| 4.5.1 | Análise 1 – Tempo de reação .....   | 49 |
| 4.5.2 | Análise 2 – Tempo de reação em paragem e em sinal luminoso.....                   | 50 |
| 4.5.3 | Análise 3 – Distância mínima entre veículos .....                                 | 52 |
| 4.5.4 | Análise 4 – Aceleração máxima .....   | 53 |
| 4.5.5 | Análise 5 – Tempo de reação, tempo de reação em paragem e em sinal luminoso       | 55 |

---

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 4.5.6 | Análise 6 – Tempo de reação e distância mínima entre veículos.....               | 56 |
| 4.5.7 | Análise 7 – Tempo de reação e aceleração máxima.....                             | 58 |
| 4.5.8 | Análise 8 – Tempo de reação com diferentes carregamentos de rede.....            | 60 |
| 4.5.9 | Análise 9 – Tempo de reação, distância mínima entre veículos e aceleração máxima | 63 |
| 5.    | CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS DE TRABALHOS FUTUROS .....                             | 65 |
| 5.1   | Conclusões .....   | 65 |
| 5.2   | Recomendações para trabalhos futuros.....  | 67 |
|       | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....   | 69 |

## SIMBOLOGIA

### Maiúsculas Latinas

|       |   |
|-------|---|
| $T$   | Tempo de reação   |
| $V$   | Velocidade  |
| $V_a$ | Velocidade máxima que um veículo pode alcançar em aceleração, sem a presença de um veículo <i>líder</i>                   |
| $V_b$ | Velocidade máxima que um veículo pode alcançar de acordo com as limitações impostas pela presença do veículo <i>líder</i> |
| $V^*$ | Velocidade desejada   |

### Minúsculas Latinas

|      |   |
|------|---|
| $a$  | Aceleração máxima                             |
| $d$  | Desaceleração máxima desejada                 |
| $d'$ | Estimação da desaceleração desejada           |
| $n$  | Veículo $n$                                   |
| $s$  | Comprimento efetivo de um veículo             |
| $t$  | Instante de tempo                             |
| $x$  | Posição de um veículo na via onde se encontra |

### Alfabeto Grego

|           |   |
|-----------|---|
| $\alpha$  | Parâmetro de agressividade do condutor          |
| $\lambda$ | Fluxo médio de entrada (na geração de veículos) |

### Unidades

|                     |  |
|---------------------|--|
| [m]                 | Metro (comprimento)                        |
| [s]                 | Segundo (tempo)                            |
| [m/s]               | Metro por segundo (velocidade)             |
| [m/s <sup>2</sup> ] | Metro por segundo ao quadrado (aceleração) |



## **ABREVIATURAS**

**AASHTO** – American Association of State Highway and Transportation Officials

**AIMSUN** – Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-Urban Networks

**DMV** – Distância Mínima entre Veículos

**FHWA** – Federal Highway Administration

**FMV** – Fila Média Virtual

**HCM** – Highway Capacity Manual

**PS** – Passo de simulação

**TMV** – Tempo Médio de Viagem

**TR** – Tempo de reação

**TRP** – Tempo de reação em paragem

**TRSL** – Tempo de reação em sinal luminoso

**TSS** – Transport Simulation Systems

**VTR** – Variação do tempo de reação

**UVL** – Unidade de veículo ligeiro

## GLOSSÁRIO

**Aceitação de velocidade**, *speed acceptance*, parâmetro que define o grau de aceitação dos limites legais de velocidade pelo condutor.

**Aceleração**, *acceleration*, ato ou efeito de acelerar, aumento progressivo de velocidade de um veículo (unidade:  $m/s^2$ ).

**Aceleração máxima**, *maximum acceleration*, aceleração máxima que um veículo pode atingir em qualquer circunstância (unidade:  $m/s^2$ ).

**Aimsun**, denominação do software de microsimulação de tráfego da empresa TSS, derivado do acrónimo AIMSUN, de *Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-Urban Networks*, literalmente *simulador microscópico avançado e interativo para redes urbanas e não urbanas*.

**Calibração**, *calibration*, processo de ajuste dos parâmetros de um modelo com os dados reais para garantir que o modelo representa realisticamente as condições de tráfego reais. O objetivo é minimizar a discrepância entre os resultados do modelo e as medições e observações reais.

**Cedência de prioridade**, *give way*, ato de ceder passagem ao tráfego com prioridade, ou primazia de passagem, numa interseção.

**Cenário**, *scenario*, é, no Aimsun, o agregador para os dados de entrada e experiências para executar um de vários processos. Um cenário é composto por quatro tipos de dados: descrição da rede (sistema), planos de controlo de sinais luminosos, dados de procura de tráfego e planos de transportes públicos. Ver *experiência*.

**Comprimento de um veículo**, *vehicle length*, comprimento físico de um veículo (unidade: metro).

**Comprimento efetivo de um veículo**, *effective vehicle length*, soma do *comprimento de um veículo* com a *distância mínima entre veículos* (unidade: metro).

**Corrida**, *run*, ver *Réplica*.

**Desaceleração**, *deceleration*, ato ou efeito de desacelerar, redução de velocidade de um veículo (unidade:  $m/s^2$ ).

**Desaceleração confortável**, *comfortable deceleration*, (unidade:  $m/s^2$ ). Ver *desaceleração normal*.

**Desaceleração normal**, *normal deceleration*, desaceleração máxima que um veículo pode usar em condições normais, pela não aceleração ou pela travagem (unidade:  $m/s^2$ ).

**Desaceleração máxima**, *maximum deceleration*, desaceleração máxima que um veículo pode utilizar em condições especiais, como travagens de emergência (unidade:  $m/s^2$ ).

**Distância entre veículos**, *headway*, tempo que separa dois veículos consecutivos que passam numa via, e na mesma corrente de tráfego, medido a partir de um ponto comum de ambos (como por exemplo o para-choques frontal ou eixo dianteiro) (unidade: segundo).

**Distância mínima entre veículos**, *minimum distance between vehicles*, distância mínima que um veículo deixa entre si e o veículo da frente, quando parados (unidade: metro).

**Entidade**, *entitie*, qualquer componente da infraestrutura rodoviária no *Aimsun*.

**Espaçamento**, *gap*, tempo entre a passagem consecutiva de dois veículos, medido a partir do mesmo ponto de referência de cada um (unidade: segundo). Ver *intervalo de aceitação*.

**Estado inicial**, *initial state*, estado inicial de carregamento da rede que se pode definir como ponto de partida do período de simulação desejado.

**Estocástico**, *stochastic*, têm origem em processos não determinísticos, com origem em eventos aleatórios.

**Experiência**, *experiment*, é, no *Aimsun*, o conjunto de parâmetros de simulação, definidos para cada experiência, e dentro de um determinado *cenário*. Estes parâmetros são valores fixos que descrevem a experiência (tempo de simulação, período de aquecimento, intervalos de estatísticas, etc.) e parâmetros variáveis que são usados para calibrar os modelos (tempos de reação, outros parâmetros de simulação de comportamento, etc.).

**Experimento**, (PT-BR) ver *experiência*.

**Intervalo de aceitação**, *gap acceptance*, intervalo de tempo necessário para que um veículo efetue uma manobra de mudança de via ou de entrada num novo *troço* a partir de uma interseção (unidade: segundo). Ver *espaçamento*.

**Líder**, *leader*, veículo que circula na frente de um outro veículo, isto é, que circula à frente de um veículo seguidor, numa mesma corrente de tráfego. Ver *seguimento*.

**Modelador**, *modeller*, pessoa especializada, ou técnico, que modela e desenvolve modelos.

**Modelo**, *model*, representação simplificada de uma parte da realidade, a de interesse em estudo, que se concentra em determinados elementos considerados importantes de um ponto de vista particular.

**Modelo analítico**, *analytical model*, modelo que relaciona componentes de um sistema usando considerações teóricas adequadas à situação a modelar, e calibradas e validadas com dados reais.

**Modelo determinístico**, *deterministic model*, modelo matemático que não está sujeito a aleatoriedade. Uma análise pode ser repetida com certeza do resultado.

**Modelo estocástico**, *stochastic model*, modelo matemático que está sujeito a variáveis aleatórias referentes a, pelo menos, um parâmetro de entrada.

**Modelo macroscópico**, *macroscopic model*, modelo matemático que usa e aplica variáveis de fluxo de tráfego.

**Modelo mesoscópico**, *mesoscopic model*, modelo matemático para grupos ou pelotões de veículos, incorporando formulações para indicar como estes grupos interagem.

**Modelo microscópico**, *microscopic model*, modelo matemático que modela o movimento individual de veículos.

**Mudança de via**, *lane changing*, ato de um condutor mudar de via de tráfego.

**Passo de simulação**, *simulation step*, pequena parcela de tempo, ou incremento de tempo, do tempo total de uma simulação que atualiza as entidades sujeitas a modelação discreta (unidade: segundo).

**Período de aquecimento**, *warm-up period*, período que se pode definir antes de iniciar o período de simulação desejado, para que a rede já esteja carregada no ponto de início do período de simulação (unidade: minuto).

**Réplica/Replicação**, *replication*, é, no *Aimsun*, o objeto simulado dentro de uma *experiência*. É onde é definida a *semente aleatória*.

**Seguidor**, *follower*, veículo que circula com um outro veículo à sua frente, isto é, que está atrás de um líder, numa corrente de tráfego.

**Seguimento**, *car-following*, termo usado para designar a situação em que um veículo se encontra numa corrente de tráfego, seguindo portanto o veículo à sua frente.

**Seguimento de duas vias**, *two lane car-following*, situação em que um veículo se encontra numa corrente de tráfego, sendo o seu comportamento também afetado pela presença de veículos na via adjacente à sua direita.

**Semente aleatória**, *random seed*, número gerado aleatoriamente para gerar um valor para os parâmetros que seguem uma distribuição estatística.

**Tempo de reação**, *reaction time*, tempo que um condutor demora a reagir à mudança de velocidade do líder (unidade: segundo).

**Tempo de reação em paragem**, *reaction time at stop*, tempo que um condutor, quando o veículo está parado, demora a reagir ao início de andamento do líder (unidade: segundo).

**Tempo de reação em sinal luminoso**, *reaction time at traffic light*, tempo que um condutor, quando o veículo está parado e é o primeiro veículo da fila, demora a reagir à mudança do sinal para verde (unidade: segundo).

**Troço**, *section*, no *Aimsun* entende-se por troço de uma via rodoviária, um elemento apenas com ligações (a entradas, saídas ou interseções) no seu início e/ou fim, e é modelado como uma só entidade (unidade: metro).

**Validação**, *validation*, processo de verificação se um determinado modelo se adequa às condições dadas e para o seu objeto; compara as estimativas do modelo com as medições e/ou observações reais.

**Valor de partida**, *reference value*, é o valor de determinado parâmetro, que se considera isento de erro, sendo o real/observado no campo.

**Velocidade máxima desejada**, *maximum desired speed*, velocidade máxima que um veículo pode atingir (unidade: km/h).

**Velocidade de entrada em fila**, *queue entry speed*, velocidade abaixo da qual se considera que um veículo pertence a uma fila de veículos (unidade: m/s).

**Velocidade de saída de fila**, *queue exit speed*, velocidade a partir da qual um veículo abandona uma fila, onde era considerado estar (unidade: m/s).

**Veículo lento**, *slow vehicle*, veículo que circula a uma velocidade baixa relativamente aos restantes veículos na sua envolvente.

**Veículo rápido**, *fast vehicle*, veículo que circula a uma velocidade elevada, relativamente aos restantes veículos na sua envolvente.

**Via alvo**, *target lane*, via que um condutor deseja alcançar num determinado ponto da rede, e vai, por conseguinte, efetuar manobras para que possa chegar a essa via.

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1 Enquadramento / Importância do tema

Na atualidade os modelos de simulação microscópica de tráfego são usados de forma ampla em diversas fases do projeto e com diferentes tipos de aplicações. Estes modelos de microssimulação constituem ferramentas que apresentam um grande nível de flexibilidade, podendo ser aplicadas desde o simples estudo operacional de uma pequena interseção até à modelação do funcionamento de grandes e complexas redes urbanas. Podem incluir vários modos de transportes (individuais e coletivos), designadamente peões e ciclistas. São especialmente versáteis ao nível da apresentação de projetos e dos seus resultados, auxiliando decisivamente processos de discussão pública e de decisão política.

Estes modelos modelam a realidade com elevado grau de detalhe, onde são incluídas componentes relativas à rede de infraestruturas, à procura de tráfego, ao comportamento dos condutores, à dinâmica dos veículos e aos modelos de escolha de rotas. Estes integram uma grande gama de informação a ser recolhida e tratada e um enorme número de parâmetros. Todos estes parâmetros de entrada no modelo estão sujeitos a uma série de erros de estimação, que são a diferença entre o que se passa na realidade e o que é assumido pelo modelador como parâmetros do modelo. Muitas vezes estes erros acontecem pela impossibilidade/dificuldade de recolher dados no campo, por falhas ou imprecisões nos dados recolhidos, por considerações e aproximações grosseiras em relação a outros modelos ou ainda por erros computacionais relativos ao funcionamento dos modelos.

Na construção de um modelo de simulação, ao processo de ajustamento dos parâmetros de modo a descrever, de forma fidedigna, a situação real que se pretende estudar, dá-se o nome de *calibração*. Este processo de calibração é muitas vezes moroso, sujeito à quantidade e qualidade de informação disponível, e/ou a possível de recolher no campo, tratando-se de uma fase fundamental do processo de construção de um modelo. Em qualquer caso de seguida deverá sempre haver um período de confirmação da capacidade preditiva do modelo, i.e., que o modelo está a representar com a precisão necessária a realidade modelada, a que se chama a fase de *validação*.

O manual da Federal Highway Administration, *Traffic Analysis Toolbox Volume III: Guidelines for Applying Traffic Microsimulation Modeling Software* (FHWA, 2004) refere que a importância da calibração de um modelo não pode ser subestimada. Testes efetuados em seis diferentes modelos (*softwares*) mostraram que diferenças de 13% na calibração de velocidades previstas para uma via rápida nas condições iniciais se refletiram em diferenças

de 69% nas velocidades estimadas para condições futuras. Aqui é indicado que as tarefas críticas de um estudo/projeto são a recolha de dados, a construção do modelo acompanhada de verificação de erros e as fases de calibração e de validação. Este manual defende ainda que, tipicamente, os gestores de projeto dedicam 50% do orçamento de um estudo/projeto à construção do modelo, incluindo recolha de dados, 25% para o processo de calibração, enquanto que os restantes 25% poderão ser empregues em análises alternativas (utilizando outras técnicas – para comparação de resultados) e documentação. Outros gestores de projeto tenderão a dedicar recursos mais equilibrados a cada uma das três partes enunciadas.

Contudo, ao iniciar os trabalhos de um estudo/projeto a questão que mais recorrentemente se põe ao modelador é: Qual a informação mais importante e, por consequência, onde se justifica aplicar os recursos disponíveis? A FHWA (2004) refere que é de igual importância definir o que se vai estudar, como o que não se vai estudar. Em complemento a estas dúvidas, há ainda que definir qual o nível de precisão que é necessário associar a cada parâmetro de calibração para salvaguardar que o modelo represente a realidade de forma satisfatória. Vasconcelos (2004) cita o Departamento de Transportes do Reino Unido sobre esta preocupação quando este refere que *“a adequação de um modelo a um fim específico não deve ser julgada pela sua sofisticação, mas antes pela facilidade com que permite fornecer informações essenciais para tomar e justificar decisões”*.

Assim coloca-se o problema de qual o grau de precisão aceitável, ou desejável, a atribuir a cada parâmetro, do modelo. Esta é uma questão relevante, uma vez que o custo de desenvolvimento de um modelo cresce rapidamente quando se exigem altos níveis de confiança (Vasconcelos, 2004). É ainda indispensável ter presente que tentar reduzir a zero os erros na estimação de determinados parâmetros, na maioria dos casos não se justifica, seja porque não é genericamente possível, ou porque o custo marginal associado é superior ao benefício marginal resultante do acréscimo da qualidade dos resultados. Deste modo torna-se importante estabelecer uma relação entre os níveis de erro de entrada (ou erro nos parâmetros) com os erros que estes provocam nos resultados simulados, numa tentativa de potenciar a quantificação simultânea dos custos associados à redução dos primeiros e os benefícios associados à redução dos segundos.

É nestas questões que se centra o presente trabalho de investigação. Procura-se avaliar o impacto que a introdução sistemática de erros ao nível dos parâmetros de calibração assume na qualidade dos resultados modelados, de modo a apoiar decisões do modelador sobre quais os parâmetros relevantes à calibração e o nível de precisão a assegurar.

## 1.2 Objeto de estudo e objetivos

Perante um novo estudo/projeto, o modelador pode abordar o problema de várias formas, na escolha de quais os valores a atribuir aos diversos parâmetros de calibração: (i) optar por usar dados resultantes de recolha do campo; (ii) usar dados de outras experiências anteriores que se considerem adequados ou, (iii) simplesmente optar pelos valores apontados por defeito no *software*. O modelador pode, em alternativa, fazer uma combinação destas três opções, ou ainda fazer um estudo para identificar os diferentes parâmetros mais relevantes ao trabalho em curso, analisando a influência da introdução de erros nos parâmetros do modelo. Contudo e na realidade, este acaba por recorrer maioritariamente aos valores apontados por defeito pelo *software*, já que a alteração fundamentada de um parâmetro deverá requerer trabalhos de recolha de dados complementares e que podem ser minuciosos e dispendiosos. A lógica de como o modelador pode abordar a construção de um novo modelo de simulação está esquematizada na Figura 1.1.

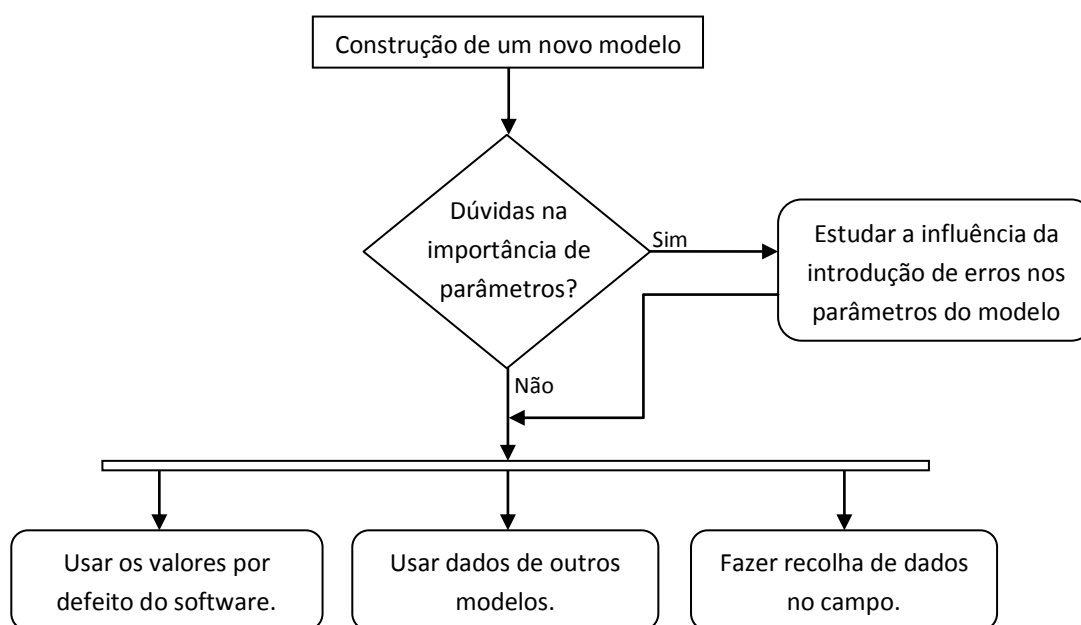


Figura 1.1 – Esquema geral da possível abordagem do modelador a um problema de simulação de transportes.

Neste contexto, o presente trabalho centra-se na avaliação da fiabilidade oferecida por modelos de microssimulação e na importância associada ao processo de calibração do modelo. Pretende-se avaliar o efeito que a introdução de erros sistemáticos e controlados nos parâmetros de calibração assumem nos resultados modelados, procurando assim identificar os parâmetros que mais influenciam a qualidade dos resultados. Paralelamente procura-se apoiar as decisões do modelador na afetação dos recursos na fase de recolha e tratamento dos dados,

já que a partir de determinada altura o custo marginal de redução do erro introduzido tende a ser superior ao benefício marginal associado à melhoria da qualidade dos resultados obtidos. Estas decisões sobre quais os parâmetros a avaliar, e qual o grau de precisão necessário, são potencialmente muito importantes no processo de construção, calibração e validação de um modelo.

Como resultados finais desejáveis, foi definida a identificação dos parâmetros em que se justifica despende um elevado grau de exatidão, bem como a identificação dos parâmetros onde a introdução de erros grosseiros de entrada tem apenas uma pequena influência nos resultados.

Foi ainda objetivo deste trabalho apresentar os resultados de forma simples e expedita, de modo a permitir apoiar os modeladores, ou especialistas, na tomada de decisões, tendo por base as características e exigências do projeto base.

### 1.3 Metodologia adotada

A metodologia adotada passou por cinco fases fundamentais e sequenciais entre si: (i) estudo detalhado dos modelos microscópicos que integram o modelo de microssimulação (ii) identificação dos parâmetros de calibração envolvidos nos diferentes modelos microscópicos, seu significado e tipo de influência nos resultados finais (iii) seleção dos parâmetros a serem objeto de estudo; (iv) seleção do indicador de desempenho a considerar nas análises, e (v) avaliação dos impactos da introdução de erros nos parâmetros de calibração, na qualidade dos resultados finais.

Para o desenvolvimento do trabalho, optou-se por selecionar o modelo de microssimulação *Aimsun (Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-Urban Networks)*, pelo fato de constituir um instrumento de trabalho com qualidades reconhecidas entre a comunidade científica internacional da especialidade, e que tem vindo a ser recorrentemente utilizado por diversos investigadores do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra. Nesse contexto as *fases i e ii*, tiveram por base os micromodelos diretamente embebidos neste *software*, assim como nas abordagens teóricas que lhe estão subjacentes.

Optou-se ainda por assentar o desenvolvimento de todo o trabalho na construção de um modelo de um cruzamento semaforizado, baseado num caso real e que serviu de base de referência comparativa para o estudo. Esta opção permitiu que o modelo construído fosse apoiado por recolhas de dados de campo, indispensáveis quer ao processo de codificação da rede, quer de calibração (não exaustiva), e conseqüente validação. Como princípio de base às



análises comparativas, assumiu-se que o modelo construído como referência é um modelo representativo de “uma realidade” possível, procurando simular uma realidade virtual que não é obrigatoriamente “a realidade” observada. Tendo por base as características prevalentes do estudo de caso, procedeu-se à seleção dos parâmetros cuja variação de valores, i.e. introdução de erros, se considera poder ter mais impacto nos resultados finais (*fase iii*).

Seguidamente, a *fase iv* centrou-se na seleção dos indicadores de desempenho a avaliar. O *Aimsun* disponibiliza um conjunto alargado de indicadores (fluxos horários, demoras, tempos de viagens, etc.) os quais podem assumir uma forma global ou individualizada (por veículo, movimento direcional, elemento infraestrutural, etc.). Para o desenvolvimento desta fase procurou-se selecionar um indicador robusto, capaz de representar o comportamento do modelo e ser suficientemente sensível às variações impostas na precisão dos diferentes parâmetros de calibração previamente selecionados. Optou-se por selecionar um só indicador (*tempo médio de viagem*) e que serviu de base a todas as análises comparativas.

A última fase do trabalho (*fase v*) incidiu na avaliação dos impactos da variação dos valores dos parâmetros de calibração – introdução de erros de quantificação – nos resultados do modelo. A definição da possível gama de variação associada a cada parâmetro de calibração foi baseada na literatura da especialidade, garantindo que a variação se mantém dentro de valores realistas. Definiu-se ainda como incremento de variação dentro de cada intervalo, o valor de 10% da amplitude máxima (entre o mínimo e o máximo). Também se considerou interessante alargar ligeiramente esses intervalos de variação para além dos valores que, por princípio, se observam no campo, de modo a tentar melhor identificar os padrões de relação entre os erros de quantificação e os resultantes erros nos *outputs*.

Por fim efetuaram-se as análises, com a devida avaliação de resultados e posteriores conclusões. A abordagem metodológica encontra-se esquematizada na Figura 1.2.

Tão importante como seguir a metodologia já descrita, foram os princípios adotados que pautam todo o trabalho. O mais importante foi o de manter a simplicidade e realismo ao longo das análises efetuadas. Ou seja, procurou-se analisar a introdução de erros que se poderiam verificar num qualquer estudo ou projeto, efetuado por qualquer entidade ou empresa especializada, para que o trabalho efetuado possa ter, tanto quanto possível, uma utilidade prática.

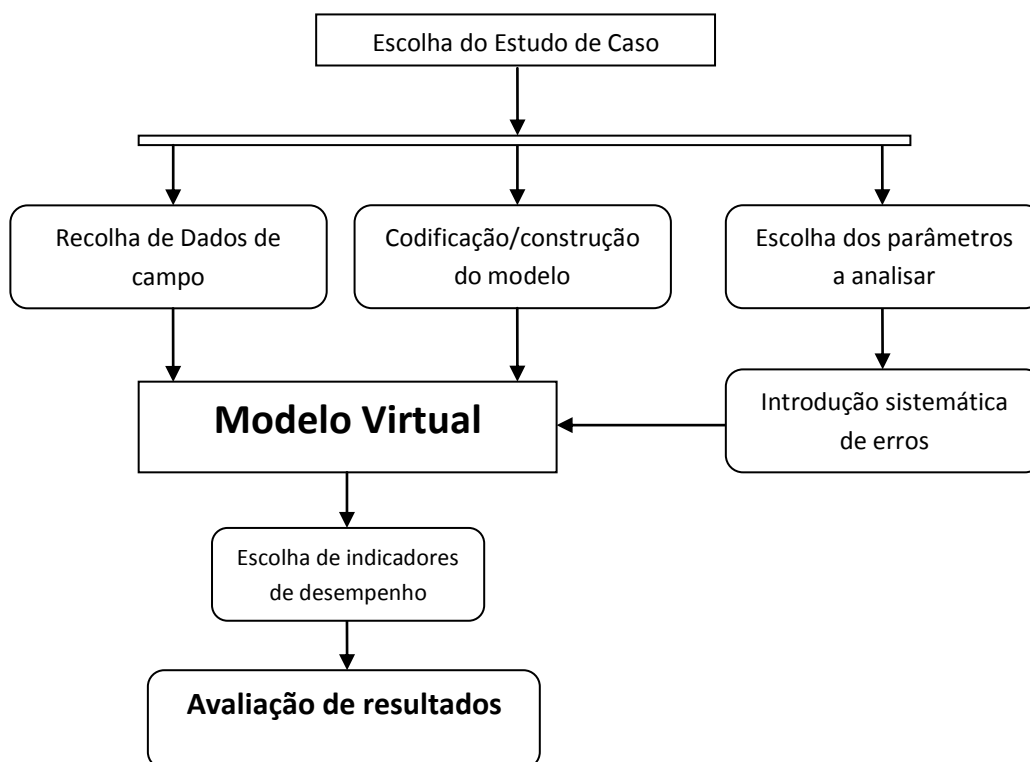


Figura 1.2 – Metodologia de abordagem

Mesmo que primeiramente este ponto possa parecer de pouca importância, na verdade os *softwares* de microssimulação e, em especial, o *Aimsun*, são dotados de uma grande capacidade de reproduzir toda a aleatoriedade do comportamento dos modelos reais na simulação. Contudo o *software* permite também controlar e reduzir consideravelmente essa aleatoriedade (como mudanças na geração de veículos, controlo das *sementes aleatórias*, dos parâmetros resultantes de distribuições estatísticas, etc.) com resultados finais bastante mais espectáveis e previsíveis. Mas este controlo, apesar de tentador, afasta os estudos e respetivos resultados do que acontece na realidade nos processos de modelação, prevalecendo assim neste trabalho, o princípio de manter as aleatoriedades dos modelos sempre presentes.

A par do princípio enunciado, também se julgou importante perseguir a maior uniformização e condições possíveis para uma eficaz análise e comparação dos resultados alcançados, seja por algum cuidado na utilização dos termos técnicos, seja pela formatação e apresentação dos resultados, especialmente a nível gráfico.

## 1.4 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação está dividida em cinco capítulos com as suas respectivas seções e sub-seções. Depois do presente capítulo de introdução ao trabalho e apresentação dos objetivos e metodologia de abordagem, segue-se o capítulo 2 onde se apresenta, de forma sintética, os diferentes tipos de modelos de simulação (níveis macro, micro e meso), características e domínios privilegiados de cada um. Por fim é feita uma apresentação da aplicação *Aimsun*. É abordada toda a lógica de simulação implícita ao modelo global, algumas das suas características mais importantes, os modelos e submodelos de microssimulação, assim como outros processos de cálculo considerados relevantes, utilizados internamente pelo *Aimsun*.

No capítulo 3 são apresentados alguns dos parâmetros de calibração mais importantes no funcionamento do *Aimsun*, tendo por base uma recolha bibliográfica incidente sobre a importância de cada um, o que estes afetam, e ainda os seus valores característicos, presentes da literatura da especialidade (a maioria resultantes de estudos aprofundados); dos valores indicados pelo *Aimsun*, e ainda dos recomendados por relatórios técnicos da especialidade.

No capítulo 4 apresenta-se o trabalho de modelação e análise desenvolvido. Começa-se por fazer uma descrição detalhada de todos os passos e decisões do processo de construção do modelo de microssimulação que serviu de base às análises. Posteriormente faz-se uma apresentação dos estudos a efetuar – as análises – com o devido enquadramento e os intervalos de valores para os erros a introduzir. Seguidamente é feita uma seleção do(s) indicador(es) de desempenho a usar para análise dos resultados, sendo depois apresentados os resultados de todas as análises efetuadas, com as respetivas representações gráficas julgadas pertinentes, culminado numa nota de considerações finais.

Por fim, no capítulo 5, tecem-se conclusões sobre os resultados alcançados, e apresenta-se ainda uma nota final com recomendações para trabalhos futuros nesta área.

Termina-se com uma listagem das referências bibliográficas mais importantes consultadas para a realização deste trabalho.

Com o objetivo de apoiar a leitura e compreensão do trabalho, designadamente por leitores não especialistas, foi elaborado um glossário. Durante a realização desta dissertação verificou-se uma grande disparidade de termos técnicos, diferenças entre os termos e conceitos usados pelos vários autores citados, tanto pela sua origem, como pela diferença temporal dos seus trabalhos, como ainda pelo contexto em que são usados.

## 2. MODELOS DE SIMULAÇÃO

Neste capítulo faz-se uma apresentação sumária dos diferentes tipos de modelos de simulação aplicados à engenharia de tráfego e transportes e uma descrição detalhada dos micromodelos integrados na aplicação informática *Aimsun*.

### 2.1 Introdução

Um modelo pode ser definido como uma representação simplificada de uma parte da realidade – o sistema de interesse – que se concentra em determinados elementos considerados importantes de um ponto de vista particular. Os modelos são, portanto, específicos em relação ao problema analisado e à perspectiva de quem o aborda. Desta definição, podemos distinguir entre dois tipos de modelos, os modelos físicos e os abstratos. Os modelos físicos são tradicionalmente usados para grandes estruturas de engenharia civil, como pontes ou barragens, simulando-se depois ações sobre essa estrutura observando o comportamento desta face a essas solicitações. Nos modelos abstratos temos uma representação, com maior ou menor formalidade, de algumas teorias acerca do sistema de interesse e como este funciona. Estes modelos têm um papel importante na forma como é interpretada a realidade e os modelos analíticos usados. Dentro dos modelos abstratos, os de maior interesse e importância para o presente trabalho são os modelos matemáticos. Os modelos matemáticos tentam reproduzir o sistema de interesse e o seu comportamento através de equações matemáticas baseadas em considerações teóricas sobre o sistema. Estes modelos são sempre uma representação simplificada da realidade, podendo, contudo, assumir níveis de grande complexidade, com grandes quantidade de informação a ser usada. Ainda assim, os modelos são de um enorme valor para analisar e tomar decisões de nível mais estratégico ou prático (Ortúzar & Willumsen, 2001). A descrição geral dos diferentes tipos dos modelos usados em engenharia de tráfego e de transportes são apresentados nas seções seguintes.

### 2.2 Tipos de modelos e domínio privilegiado de aplicação

Existem vários tipos de modelos que podem ser classificados de acordo com as diferentes abordagens (Hoogendoorn & Bovy, 2001):

- Tipo de variáveis independentes (contínuas, discretas);
- Nível de detalhe dos elementos modelados (macroscópicos, mesoscópicos, microscópicos, nanoscópicos/submicroscópicos);
- Representação dos processos de escolha de trajetos (determinísticos, estocásticos);
- Abordagem metodológica (analítica, simulação);

- Escala de aplicação (redes, extensão/aumento de uma rede, *troço* de uma via, intersecção);

Das anteriores, é a abordagem de classificação de acordo com o nível de detalhe dos elementos modelados a mais usada atualmente para diferenciar o tipo de projetos. É esta a que vai de encontro com os diferentes tipos de ferramentas disponíveis em pacotes comerciais, usadas de modo generalizado, seja por autoridades nacionais ou regionais com as tutelas de planeamento de transportes, seja por empresas consultoras nessas áreas, e como tal, a que também se adequa melhor aos diferentes níveis de decisão em transportes, que são os níveis estratégico, tático e operacional. O nível estratégico é onde se definem os objetivos a atingir e os recursos a utilizar, o nível tático é onde se definem os tipos de soluções e onde se faz o seu planeamento enquanto no nível operacional executa-se e acompanha-se o que foi planeado e realiza-se, se necessário, um reajustamento (Correia, 2011).

### 2.2.1 Modelos macroscópicos

Os *modelos macroscópicos* fornecem uma representação simplificada da realidade, caracterizando-se pela análise integrada das correntes de tráfego, sendo os diversos estados de tráfego determinados através das relações entre as variáveis fundamentais do tráfego: fluxo, densidade e velocidade (Vasconcelos, 2004). Estes modelos simulam os fluxos de tráfego com elevado grau de agregação, não sendo feita a distinção das suas partes integrantes, como pelotões e veículos (Hoogendoorn & Bovy, 2001).

De um modo geral funcionam com base numa simplificação da realidade, em que o modelo de uma rede é construído de modo equiparável ao tradicional modelo de grafos, constituído por arcos e nós, significando estes as vias de comunicação e as suas intersecções respetivamente, fazendo-se então a modelação do sistema real sobre esta rede. Nestes modelos é assumido que todos os veículos se comportam de maneira semelhante (comportamento homogéneo e consistente, caracterizados por parâmetros de valores médios), e que cada intersecção é modelada de modo bastante simplificado, assumindo-se apenas um tempo de atraso para os veículos que a cruzam.

Estes modelos revelaram-se de grande utilidade, em especial para aplicação a redes interurbanas, tendo, contudo, muitas limitações para aplicação a meio urbano. Neste tipo de modelos a representação da realidade é feita com muito pouco detalhe, sendo que em meio urbano o peso das intersecções no custo total de percurso (em tempo, por exemplo) é muito significativo. A aplicação destes modelos revela-se no entanto extremamente útil para apoio à decisão no sector dos transportes a num nível estratégico, aplicado a redes regionais, de zonas

metropolitanas ou periurbanas, e com boas condições de aplicabilidade particularmente em ambientes não congestionados.

### 2.2.2 Modelos microscópicos

A crescente necessidade de assegurar detalhe na modelação de tráfego, em especial com o advento dos Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS), tanto nas tecnologias disponíveis, como na necessidade de haver ferramentas de modelação que os possam incluir, e com o crescimento rápido das capacidades computacionais na última década, os *modelos microscópicos* de simulação tiveram uma rápida evolução, tanto em termos da sua fiabilidade, como no seu domínio de aplicação.

Ao contrário dos modelos *macroscópicos*, os *modelos microscópicos* não fazem uma modelação com agregação dos elementos constituintes, mas sim uma modelação por agentes onde são simuladas as ações e interações de indivíduos autónomos com o objetivo de compreender o efeito dos seus comportamentos no sistema em geral. O sistema de interesse é simulado capturando o comportamento dos agentes individuais, ou seja, os indivíduos, e as suas interligações (Correia, 2011).

Na simulação microscópica, ou microssimulação, de tráfego, os modelos fazem a reprodução do comportamento de cada veículo e a sua interação com a rede. Associam-se aos veículos variáveis aleatórias e respetiva distribuição de probabilidades aos seus atributos mais importantes, tais como o intervalo de tempo entre veículos, a distância entre veículos e a velocidade individual (Costa, 2008), sendo que o tempo e/ou a distância entre veículos podem ser obtidos em função de um ou de outro a partir da velocidade, dependendo do *software* que se esteja a usar.

Os domínios de aplicação destes modelos são ao nível tático e operacional para apoio à decisão no sector dos transportes. São especialmente úteis para avaliar condições de funcionamento de redes urbanas complexas, tendo incorporados modelos de filas de espera e de comportamento dos condutores (Correia, 2011). Assim quando se quer analisar uma zona urbana específica, com inúmeras vias e interseções, podendo estas ser interseções de grande complexidade, com particularidades especiais, ou que envolvam diferentes tipos de utilizadores com características e condições de operação muito diferenciados (por exemplo veículos de transporte público que beneficiam de corredores próprios e prioridade nos cruzamentos regulados por sinais luminosos) e problemas significativos de congestionamento, os modelos microscópicos são uma escolha aconselhada, já que conseguem simular o seu funcionamento com elevado grau de fiabilidade.

O grande desafio da aplicabilidade destes modelos é precisamente o seu grau de detalhe, que obriga a um grande esforço de construção e, particularmente, de calibração dos modelos, exigindo uma grande quantidade de informação. Torna-se necessário tomar decisões sobre qual o nível de precisão necessário, ou adequado, para a grande quantidade de parâmetros, e variáveis de *input*, que afetam o modelo, e adequar esse níveis de precisão para cada parâmetro em cada situação particular.

### 2.2.3 Modelos mesoscópicos

Os *modelos mesoscópicos* vieram aumentar o nível de desagregação dos *modelos macroscópicos*, permitindo uma representação da realidade com mais detalhe. Trata-se de uma combinação de aspetos dos modelos *macro* e *micro*. Estes modelos já fazem uma aproximação ao comportamento individual de cada veículo, ou grupos de veículos – pelotões, mas associando-lhes as leis fundamentais dos modelos macro, especificando também os comportamentos dos indivíduos (veículos), como, por exemplo, a nível probabilístico (Hoogendoorn & Bovy, 2001; Vasconcelos, 2004). Estes modelos utilizam, de certo modo, os efeitos de interação, como por exemplo, o efeito que um cruzamento tem noutros cruzamentos adjacentes.

Os resultados provenientes destes modelos podem ser uteis para servir de apoio à decisão no sector dos transportes tanto no nível estratégico como tático. Têm a vantagem de já conseguirem modelar o comportamento numa rede viária em meio urbano com bastante mais precisão relativamente aos modelos macro, em particular porque já conseguem boas representações de situações onde se registam moderados níveis de congestionamento de tráfego.

### 2.2.4 Integração de modelos a vários níveis e modelos híbridos

Embora a seleção do modelo a adotar dependa dos objetivos subjacentes ao trabalho, existem situações em que é útil a construção de um modelo híbrido. Por modelo híbrido entende-se um modelo em que se combinam diferentes níveis de detalhe em determinadas zonas.

Os modelos híbridos são recomendados para redes viárias de grande escala com áreas específicas onde o nível de detalhe tem de ser maior, mas com uma avaliação global da rede. O uso de um modelo macroscópico ou mesoscópico nalgumas áreas, e microscópico noutras, pode tornar uma modelação mais fiável e requerer menor esforço computacional (TSS, 2012a).

De notar ainda que a definição de modelo híbrido pode ter significados algo diferentes. Por exemplo segundo a TSS (2012a) entende-se por modelo híbrido um modelo com zonas específicas onde é usado um modelo mesoscópico, interligadas com outras zonas onde é usado um modelo microscópico. Já segundo o Austroads (2006) entende-se como um modelo híbrido, um modelo num nível intermédio entre os modelos macroscópicos e microscópicos, sendo, portanto, o que se descreveu atrás como modelo mesoscópico.

## 2.3 A Aplicação Aimsun

### 2.3.1 Apresentação

A aplicação *Aimsun* (*Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-Urban Networks*) é um *software* de simulação de transportes que teve a sua origem nos anos 90, na Universidade Politécnica da Catalunha, Barcelona, Espanha. Com a evolução desta aplicação foi formada uma empresa *spin off*, a TSS – *Transport Simulation Systems*, tendo o *Aimsun*, a partir daí, a forma de pacote de *software* comercial. Este modelo tem vindo a evoluir no tempo e atualmente integra três simuladores: simulador microscópico, simulador mesoscópico e um simulador híbrido. Para o presente trabalho apenas se irá abordar o microscópico, na versão 7.0.4 do *Aimsun* (Outubro de 2012).

Tal como já referido em 2.2.2, e segundo a TSS (2012a), este simulador microscópico modela continuamente o comportamento de cada veículo existente na rede, durante o período da simulação, enquanto este circula pela rede viária, de acordo com vários micromodelos de comportamento, descritos nas seções seguintes. Este modelo de simulação microscópico é um modelo de simulação discreta combinado com simulação contínua. Ou seja, existem alguns elementos no sistema modelado, como os veículos ou os detetores, nos quais o seu estado muda continuamente durante o tempo de simulação, o qual é dividido em pequenos intervalos de tempo fixos, que têm o nome de *passo de simulação*, enquanto existem também outros elementos, como sinais luminosos ou pontos de entrada na rede, cujo estado muda de modo discreto em momentos específicos ao longo do tempo de simulação.

O sistema representa a rede com grande nível de detalhe. Faz a distinção entre diferentes tipos de veículos e condutores, possibilita a introdução dos mais variados tipos de seções e interseções com diferentes configurações geométricas, e é também capaz de simular incidentes, manobras conflituosas, ocupações parciais de via e outros similares, tendo ainda a capacidade de simular a maioria do equipamento de tráfego presente numa rede viária real, como sinais luminosos, detetores, sinais de mensagem variável, entre outros.



Os simuladores microscópicos de tráfego usam na sua maioria, e tradicionalmente, como base os modelos de comportamento das famílias de “seguimento”, de “mudança de via” e de “intervalo de aceitação” (do inglês *car-following*, *lane-changing* e *gap-acceptance*, respetivamente) para simular o comportamento de um veículo, não sendo o *Aimsun* uma exceção. Estes modelos de base serão apresentados mais à frente neste capítulo.

### 2.3.2 O processo de simulação microscópica no Aimsun

O processo de simulação no *Aimsun* pode ser considerado como um processo de simulação misto, combinando uma abordagem de agendamento de eventos com um rastreio de atividade. A Figura 2.1 mostra o esquema do funcionamento do processo de microssimulação no *Aimsun*.

Em primeiro lugar tem-se a inicialização do modelo. Aqui o modelador pode optar por iniciar a simulação tendo veículos distribuídos por toda a rede. Para isto existem duas possibilidades: a primeira é aplicando um *período de aquecimento* e a segunda é usando um *estado inicial* da rede. Um *período de aquecimento* serve para se evitar iniciar a simulação com a rede em vazio, definindo então o modelador a duração do tempo deste período. Já um *estado inicial* é um objeto que mantém as posições dos veículos de um certo instante da simulação, ou seja, guarda a localização dos veículos em secções e intersecções da rede. Um estado inicial pode guardar a localização dos veículos na rede no fim ou em qualquer ponto de uma simulação.

Em cada passo de simulação o ciclo de simulação atualiza os eventos agendados que não estão dependentes de nenhuma condição (como mudanças de sinal luminoso, que não dependem do fim de outras atividades). Após este processo de atualização, uma série de ciclos começam a atualizar as entidades. Assim que a última entidade é atualizada, o simulador procede à realização das tarefas restantes como introduzir novos veículos, recolher nova informação, etc. Dependendo no tipo de simulação, i.e., como se define a afetação de tráfego, os novos veículos são introduzidos na rede de acordo com os procedimentos de geração de fluxos nas secções de entrada, ou então usando matrizes Origem/Destino por cada intervalo de tempo e escolha de rotas de forma explícita. Neste caso, o processo de simulação inclui um cálculo inicial de rotas de cada *troço* para cada destino, de acordo com o critério de custo definido pelo modelador.

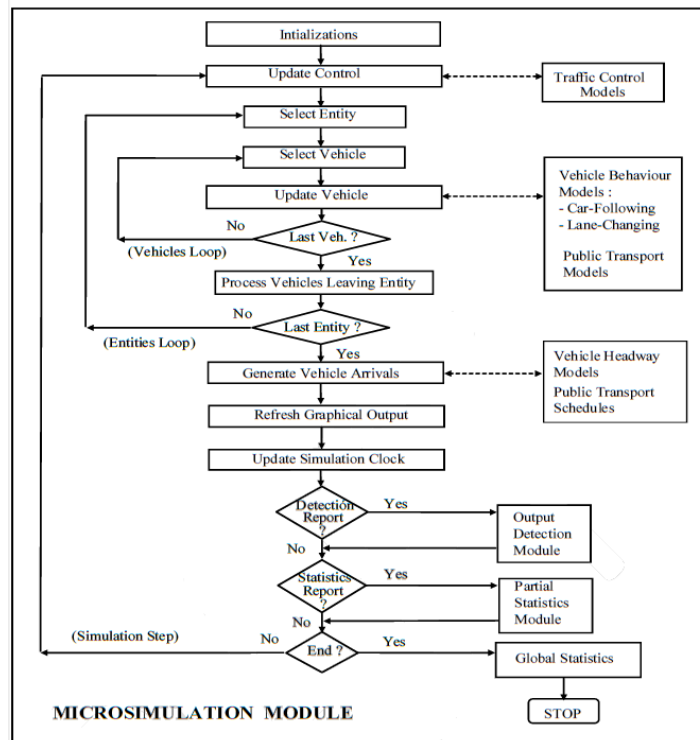


Figura 2.1 – O processo de microsimulação no *Aimsun* (TSS, 2012a).

### 2.3.3 Geração de veículos

A geração de veículos, também conhecida como chegadas, do inglês *arrivals*, reflete a forma como os veículos são gerados nos centróides e introduzidos na rede, sendo definido o intervalo de tempo entre a geração de dois veículos consecutivos num mesmo centróide. No *Aimsun* os veículos a introduzir na rede podem ser gerados de diferentes modos, associados a diferentes funções. Esses diferentes modos são a geração exponencial, uniforme, normal, constante, *ASAP* ou a geração externa, sendo que as três primeiras seguem as distribuições homónimas. Das restantes, na geração constante o intervalo de tempo entre a geração de dois veículos consecutivos é sempre igual, e no caso da geração *ASAP*, do inglês *As Soon As Possible*, literalmente *assim que possível*, consiste na geração imediata e consecutiva de todos os veículos previstos, assim que haja espaço na rede para a sua entrada, sendo utilizada em casos especiais, como situações de emergência. Por fim a geração externa é o uso de uma função externa escolhida pelo modelador para melhor se representar algum caso em especial ou realidade local.

Como representado na Figura 2.2, na geração exponencial e uniforme o fluxo médio de entrada (em veículos por segundo) é  $\lambda$ , e o tempo médio entre a geração de dois veículos é  $1/\lambda$ . Na geração uniforme é também usado um intervalo de tempo pré definido para a geração

dos veículos. Na Figura 2.3 podemos observar as diferenças entre a geração de veículos segundo as diferentes funções.

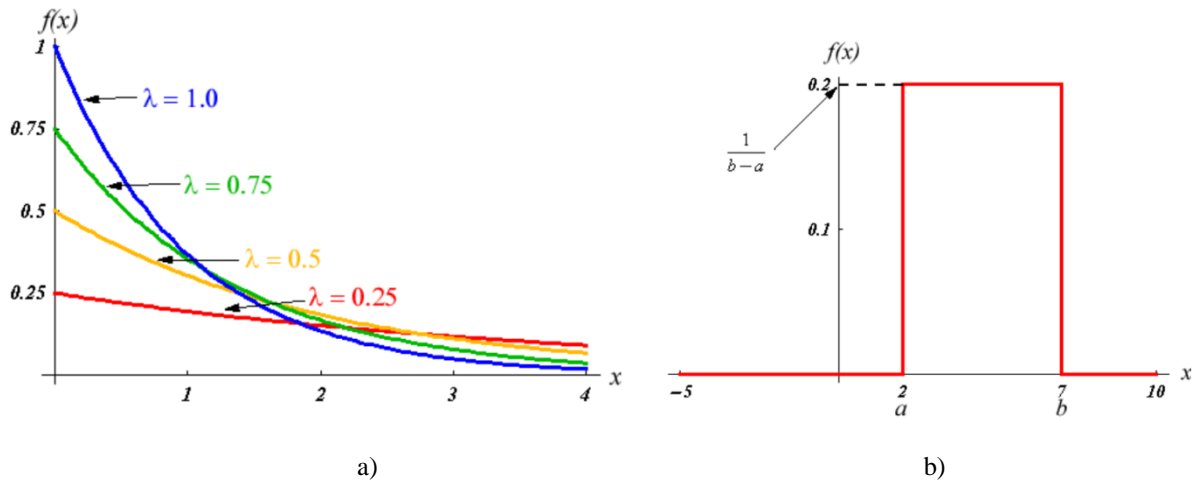


Figura 2.2 – Funções de distribuição usadas na geração de veículos (adaptado de TSS (2012a)).  
 a) Exponencial; b) Uniforme

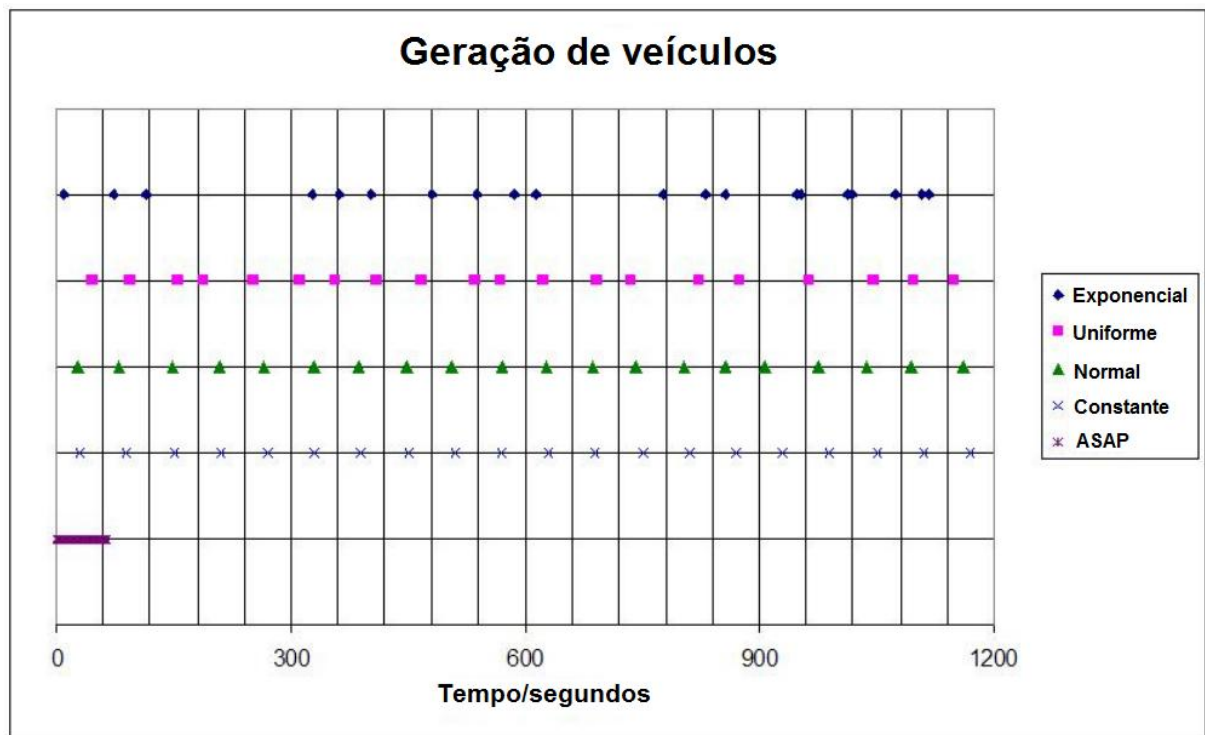


Figura 2.3 – Comparação entre os diferentes tipos de geração de veículos no Aimsun (adaptado de TSS (2012a)).

A escolha da função a usar na geração de veículos é uma escolha de partida (definida no *Aimun* a nível do *cenário*) para toda uma análise de microssimulação, sendo algo sensível e que pode afetar significativamente os resultados finais desse estudo. Luttinen (2004) indica vários estudos que demonstraram que com algumas considerações simplificadoras (não existência de interação entre veículos, distribuição estatística de velocidades idêntica e independente) o número de veículos num qualquer intervalo de tempo arbitrário vai seguir uma distribuição de *Poisson* assintoticamente à medida que o tempo tende para infinito, e assim sendo, os *intervalos de tempo entre veículos* vão seguir assintoticamente a distribuição exponencial. No *Aimsun* a que está definida por defeito é a função exponencial.

### 2.3.4 Modelação do movimento dos veículos

À medida que circulam na rede modelada, os veículos são atualizados de acordo com os modelos de comportamento *car-following* e *lane-changing*, a cada *passo de simulação*. Os condutores tendem a circular à velocidade desejada em cada *troço*, mas o ambiente em redor (i.e. o *líder*, veículos em vias adjacentes, sinais de trânsito e sinais luminosos, bloqueios de passagem, etc.) condiciona o seu comportamento. O *passo de simulação* pode afetar não só o esforço computacional mas também alguns resultados da simulação, como a capacidade de seções, por exemplo (TSS, 2012a).

Cada vez que o sistema é atualizado, ou seja, a cada *passo de simulação* e para cada veículo, se for necessário mudar de via, é aplicado o modelo de *lane-changing*, no caso de o veículo não mudar de via, é aplicado o modelo de *car-following*. Quando todos os veículos tiverem sido atualizados no presente *passo de simulação*, os veículos cuja entrada estava agendada para este *passo* são introduzidos no sistema e é gerado a introdução e agendamento dos veículos no sistema no próximo *passo de simulação*.

### 2.3.5 Relatividade dos agentes na modelação microscópica

Como se está a tratar de modelação por agentes, ou seja, cada veículo é modelado individualmente, quando se está a modelar ou analisar um destes veículos numa corrente de tráfego, a denominação de um veículo como seguidor ou líder, não é absoluta, mas sim relativa. Um mesmo veículo pode ser denominado de seguidor e de líder, dependendo de qual o foco de modelação do programa em questão.

A título de exemplo, tendo por base o esquema da Figura 2.4, na modelação da corrente de tráfego, cada veículo representado é modelado individualmente, tendo em conta a sua posição e a dos restantes veículos envolventes. Assim, quando se analisa a relação entre o veículo B e

C, o veículo B é o seguidor do veículo C, e o C o líder do veículo B. De modo similar, quando se analisa a relação entre o veículo C e D, o veículo C é o seguidor do veículo D, e o D o líder do veículo C, e por assim em diante.

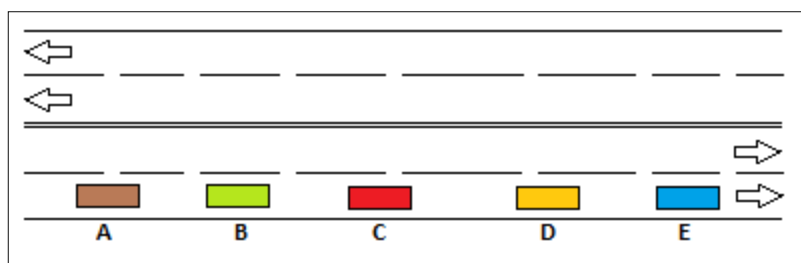


Figura 2.4 – Corrente de tráfego genérica numa qualquer via padrão.

### 2.3.6 O modelo Car-Following

O modelo de “seguimento”, doravante designado como *car-following*, procura descrever a situação mais comum de um veículo em movimento numa via, que é o de estar a seguir outro veículo inserido na mesma via de tráfego.

Como descrito por Barceló (2002), as teorias que descrevem o modo como um veículo segue outro foram inicialmente desenvolvidas nos anos 50 e 60, depois dos desenvolvimentos pioneiros de A. Reuschel, em 1950, e de Louis A. Pipes, em 1953. O trabalho de Pipes (Barceló, 2002), baseado no conceito da *distância entre veículos*, caracteriza o movimento dos veículos nas correntes de tráfego como regras de *car-following*, sugeridas no *California Motor Vehicle Code* (EUA), nomeadamente: “Uma boa regra para seguir outro veículo a uma distância segura, isto é, uma distância de segurança, é assegurar, pelo menos, a distância de um automóvel entre o seu veículo e o veículo da frente por cada 10 milhas<sup>1</sup> por hora a que esteja a viajar”.

A teoria de *car-following* de Pipes conduz a uma distância de segurança mínima que aumenta linearmente com a velocidade, um resultado que, considerando a simplicidade do modelo, aceita razoavelmente bem a calibração com dados resultantes de recolha de dados no campo. Investigação bastante mais aprofundada foi levada a cabo pelo grupo *General Motors* (EUA) no final dos anos 50, baseada em experiências para compreender o que acontecia no campo e no desenvolvimento de teorias matemáticas, fazendo a ligação entre as teorias macroscópicas e microscópicas de fluxos de tráfego. Esta investigação levou à formulação dos modelos de *car-following* na forma de equação “estímulo-resposta”, onde a resposta é a reação do

<sup>1</sup> 10 milhas são, aproximadamente, 16.09 quilómetros.

<sup>2</sup> Este relatório técnico do Austroads foi elaborado tendo em conta estudos efetuados na Austrália. A sua utilização deve ser efetuada com a devida precaução.

condutor ao movimento do veículo da frente na corrente de tráfego, sendo o estímulo o comportamento deste último. A resposta é sempre acelerar ou desacelerar na proporção do tamanho do estímulo no instante  $t$  e começa depois de uma demora de tempo  $T$ , *tempo de reação do seguidor*.

O grupo *General Motors* desenvolveu então uma série de modelos, nos quais a equação de base é da forma:

$$Resposta(t + T) = Sensibilidade * Estímulo(t) \quad (1)$$

Com esta equação de base, os modelos variam de acordo com as várias respostas às perguntas chave:

- Qual é o tipo de resposta do condutor?
- Quais são os estímulos a que ele reage e como medimos a sua sensibilidade?

O primeiro e mais simples modelo corresponde à resposta representada pela aceleração ou desaceleração do *seguidor*, e ao estímulo representado pela variação das velocidades relativas. Este modelo simples considera que a sensibilidade é constante. As hipóteses por detrás destes modelos, tal como no modelo de Pipes, é que um condutor se vai colocar a uma certa distância num determinado instante de tempo,  $\Delta(t)$ , do *líder*.

Nestes modelos referidos anteriormente, foi assumido que o *seguidor* ajusta as suas reações a uma mudança da velocidade do *líder*, aceleração e desaceleração à mesma proporção para uma dada percepção do estímulo. Contudo é expectável que as capacidades de desaceleração dos veículos sejam normalmente superiores às suas capacidades de aceleração. Tendo em consideração estas capacidades díspares, e o facto de, do ponto de vista comportamental outros fatores, como por exemplo a velocidade desejada de um condutor, devam também ser tidos em conta, Peter G. Gipps (1981) desenvolveu um modelo empírico, comportamental, ao invés de uma “resposta a um estímulo”.

O modelo empírico de Gipps consiste em duas componentes: aceleração e desaceleração, definidas com base em variáveis que podem ser medidas. A primeira representa a intenção de um veículo alcançar uma determinada velocidade desejada, enquanto a segunda representa as limitações impostas pelo veículo *líder*, quando o *seguidor* tenta conduzir à velocidade desejada. Este modelo afirma que a velocidade máxima a que um veículo ( $n$ ) pode chegar, em aceleração, durante um período de tempo ( $t, t+T$ ) e é dada por:

$$V_a(n, t + T) = V(n, t) + 2.5a(n)T \left(1 - \frac{V(n,T)}{V^*(n)}\right) \sqrt{0.025 + \frac{V(n,t)}{V^*(n)}} \quad (2)$$

Onde:

$V(n,t)$  é a velocidade do veículo  $n$  no instante de tempo  $t$  [m/s];

$V^*(n)$  é a velocidade desejada do veículo  $n$  [m/s];

$a(n)$  é a aceleração máxima do veículo  $n$  [m/s<sup>2</sup>];

$T$  é o tempo de reação [s];

Por outro lado, a velocidade máxima que o mesmo veículo ( $n$ ) consegue alcançar durante o mesmo intervalo ( $t, t+T$ ), de acordo com as suas características e as limitações impostas pela presença do veículo *líder* é:

$$V_b(n, t + T) = d(n)T + \sqrt{d^2(n)T^2 - d(n) \left[ 2\{x(n-1, t) - s(n-1) - x(n, t)\} - V(n, t)T - \frac{V^2(n-1, t)}{d'(n-1)} \right]} \quad (3)$$

Onde:

$V_b(n, t+T)$  é a velocidade máxima desejada em desaceleração do veículo  $n$ , no instante de tempo  $t+T$  [m/s];

$d(n)$  é a máxima desaceleração desejada pelo veículo  $n$  [m/s<sup>2</sup>];

$x(n, t)$  é a posição do veículo  $n$  no instante de tempo  $t$  [m];

$x(n-1, t)$  é a posição do seguidor ( $n-1$ ) no instante de tempo  $t$  [m];

$s(n-1)$  é o comprimento efetivo do veículo ( $n-1$ ) [m];

$d'(n-1)$  é uma estimativa da desaceleração desejada pelo seguidor ( $n-1$ ) [m/s<sup>2</sup>];

Da interligação entre essas duas componentes, aceleração e desaceleração, a velocidade final do veículo  $n$  durante o intervalo de tempo ( $t, t+T$ ) é a mínima das velocidades atrás definidas:

$$V(n, t + T) = \min\{V_a(n, t + T); V_b(n, t + T)\} \quad (4)$$

Por sua vez, a posição do veículo  $n$  na via onde se encontra, é atualizada em cada *passo de simulação* tendo esta velocidade (4) em conta na equação de movimento de um veículo:

$$x(n, t + T) = x(n, t) + V(n, t + T)T \quad (5)$$

Este é o modelo proposto por Gipps que é o modelo base usado no *Aimsun*. No caso de um veículo ser o primeiro da respetiva corrente de tráfego, ou seja, não ter um *líder*, este vai acelerar até à velocidade desejada.

Em consonância com as preocupações já expressas anteriormente, a questão do grau de precisão de parâmetros levanta-se aqui mais uma vez. Na exposição das formulações do

modelo de *car-following* ficou claro que parâmetros como a aceleração máxima, tempo de reação, desaceleração ou comprimento efetivo do veículo podem ter grande influência nos resultados de aplicação do modelo, ficando assim a dúvida sobre qual o grau de precisão necessário, ou adequado, para cada um deles. Da mesma forma importa perceber quais as implicações que os erros introduzidos nestes parâmetros possam ter nos resultados modelados.

### 2.3.7 O modelo *Lane-changing*

O modelo de “mudança de via”, doravante designado de *lane-changing*, tenta descrever uma situação comum nas correntes de tráfego, que é a de um veículo em movimento numa via ultrapassar o veículo que circula à sua frente, o *líder*, fazendo para isso uma *mudança de via*.

Como descrito por Barceló (2002), esta mudança de via é modelada como se tratasse de um processo de decisão associado a diferentes situações:

- A necessidade de mudança de via - como, por exemplo, no caso de manobras de viragem determinadas pela rota atribuída ao veículo;
- O desejo de mudança de via - como, por exemplo, para chegar à velocidade desejada quando a do líder, é menor;
- A existência de condições favoráveis para a mudança de via, condições estas que são locais, dependendo da localização do veículo na rede viária.

Nesta ótica, o modelo *lane-changing* é um modelo de decisão, que faz uma aproximação ao comportamento do condutor através do seguinte procedimento: cada vez que o veículo é atualizado, a cada passo de simulação, é feita a seguinte pergunta:

*É necessário mudar de via?*

A resposta a esta pergunta depende de vários fatores:

- A possibilidade de executar a viragem pretendida a partir da via atual (via onde o veículo se encontra);
- A distância à próxima saída, ou ponto de decisão;
- As condições de tráfego na via atual (condições medidas em termos de velocidade e comprimento de filas).

Sempre que o veículo *líder* circula a uma velocidade inferior à desejada, o *seguidor* é induzido a tentar ultrapassá-lo. Por outro lado, e depois da ultrapassagem, quando este atinge a velocidade desejada, tenderá a regressar à via de origem (via mais à direita). Refira-se em



complemento que estas ultrapassagens referem-se apenas àquelas que se realizam em trechos com múltiplas vias no mesmo sentido de tráfego, já que o *Aimsun* não contempla ultrapassagens em trechos com uma via em cada sentido (com oposição de tráfego em sentido oposto).

Sempre que a resposta à questão “*É necessário mudar de via?*” for positiva, para concretizar a mudança de via outras duas perguntas têm de ser equacionadas:

*É desejável mudar de via?*

A resposta a esta questão passa por analisar os possíveis melhoramentos nas condições de circulação, resultantes da possível mudança de via. Estes melhoramentos são medidos em termos de aumento de velocidade e diminuição da distância percorrida. Se a velocidade na via futura for superior à da via atual, ou se a fila na via futura for inferior à da via atual, então a mudança de via é desejável.

*É possível mudar de via?*

A resposta a esta questão baseia-se na verificação se há espaço suficiente para proceder à mudança de via em completa segurança. Para isso é calculada tanto a desaceleração imposta pelo líder ao veículo que pretende mudar de via, como a desaceleração imposta por este ao veículo que o irá seguir na nova via. Se os dois rácios de desaceleração forem aceitáveis, então a mudança de via é possível.

Para chegar a uma representação mais aproximada da realidade do comportamento do condutor no processo de decisão de mudança de via, são definidas três zonas diferentes dentro de um *troço*, cada uma associada a uma motivação diferente para a mudança de via. O parâmetro considerado para a definição dessas zonas é a distância entre o *troço* inicial de cada zona e o ponto de decisão. As três zonas são as seguintes (Figura 2.5):

- Zona 1: corresponde à zona mais distante em relação ao ponto de decisão. As decisões de mudança de via são baseadas nas condições de tráfego das diversas vias envolvidas. A possibilidade de efetuar uma manobra associada ao próximo ponto de decisão ainda não é tida em conta. A quantificação da melhoria nas condições de circulação resultante da mudança de via é baseada na avaliação dos seguintes parâmetros:
  - A velocidade desejada pelo condutor;
  - A velocidade e distância ao líder atual;
  - Distância ao futuro líder;

- Zona 2: corresponde à zona intermédia. Representa a tentativa do veículo conseguir alcançar a via mais adequada à manobra desejada. Os veículos na aproximação do local de decisão, tendem a aproximar-se da via que lhe permite realizar a manobra pretendida. Ao longo desta zona os veículos avaliam os espaços disponíveis nas correntes de tráfego adjacentes e tentam atingir a via pretendida sem afetar o comportamento dos veículos que circulam nas vias adjacentes;
- Zona 3: representa a zona mais próxima do ponto de decisão. O veículo força a mudança de via de modo a realizar a manobra pretendida. Esse comportamento poderá afetar o comportamento dos veículos em vias adjacentes, impondo-lhes uma redução de velocidade ou mesmo paragem, de modo a tornar a mudança de via possível. Também os veículos na via adjacente podem alterar o seu comportamento de modo a dar espaço suficiente para que o veículo que vai mudar de via possa efetuar a manobra.

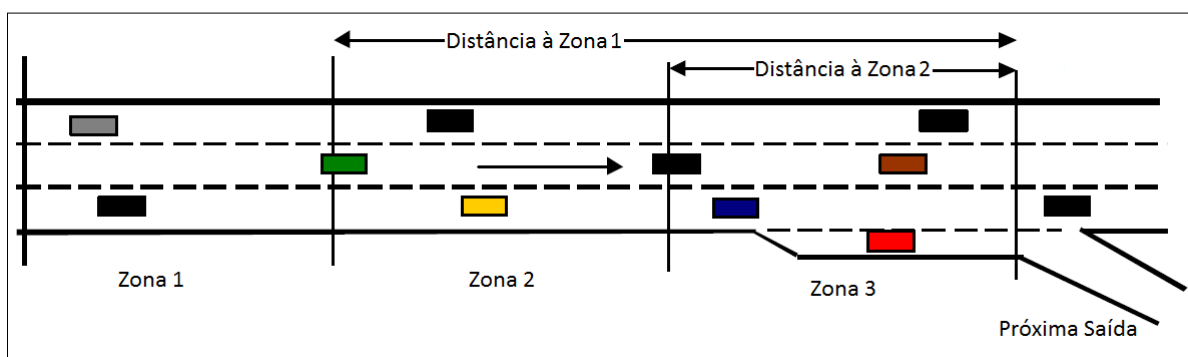


Figura 2.5 – Esquema exemplificativo das zonas de mudança de via (adaptado de Barceló (2002))

As zonas de mudança de via são definidas por dois parâmetros, a distância à zona 1 e a distância à zona 2. Estas distâncias são parâmetros locais definidos em unidades de distância. Quando um veículo atravessa a zona 1 para a zona 2 há uma mudança no comportamento do veículo, já que o próximo ponto de decisão passa a ser relevante. Também com a passagem da zona 2 para a zona 3 se vai verificar uma mudança nas regras comportamentais do veículo, atendendo a que se pode impor uma tomada de decisão urgente. O modelo *lane-changing* integrado no *Aimsun* pode ser também considerado um desenvolvimento do modelo *lane-changing* de Peter G. Gipps, de 1986 (Barceló, 2002).

Pode-se resumir a mudança de via de cada veículo  $i$  no troço  $s$  aplicando os seguintes procedimentos de cálculo:

- Cálculo de distâncias das zonas de mudança de via;
- Identificação da via alvo;

- O comportamento do veículo tendo em consideração as vias alvo;
- O submodelo *Gap Acceptance* para o *Lane-changing*;
- Espaçamento desejado e cooperação entre veículos.

As zonas de mudança de via podem ser definidas em tempo (segundos) ou comprimento (metros). A percepção destas distâncias para cada veículo pode ser perturbada usando um parâmetro que é a variância de distâncias das zonas. O submodelo *Gap Acceptance* para o *Lane-changing* está descrito em pormenor mais à frente em 2.3.9, sendo que não se julgou necessário detalhar aqui os restantes procedimentos de cálculo, podendo estes serem consultados em TSS (2012a).

Neste modelo volta-se a verificar a possível influência que alguns parâmetros possam ter nos resultados finais, como é o exemplo do parâmetro variância de distâncias das zonas, e também na forma como o *lane-changing* está dependente do modelo de *car-following*. Denota-se assim, mais uma vez, a suscetibilidade aos parâmetros já enunciados em 2.3.6. e qual o grau de precisão adequado que deve ter cada parâmetro.

### **2.3.8 O modelo *Gap Acceptance* para cedência de prioridade**

O modelo de “intervalo de aceitação”, doravante designado de *gap acceptance*, é usado para modelar o comportamento de um veículo na aproximação e atravessamento de uma interseção que imponha a cedência de prioridade a alguns movimentos, definindo as condições em que cada veículo não prioritário pode ou não avançar.

Este micromodelo calcula as distâncias/tempos dos veículos ao ponto hipotético de colisão, tendo por base o seu perfil de velocidade e de aceleração. A tomada de decisão depende dos tempos necessários para assegurar a limpeza da zona de conflito entre as correntes de tráfego conflituantes, tendo por base o nível de risco assumido por cada condutor. Com isto também se verifica, mais uma vez, a pertinência das questões relacionadas com a calibração e grau de precisão de parâmetros, e aqui em particular, qual o grau de precisão necessário ter no nível de risco assumido, e quais as implicações que essa precisão terá nos resultados. As variáveis envolvidas, assim como o esquema de funcionamento de uma interseção ou cruzamento com cedência de prioridade, estão exemplificados na Figura 2.6.

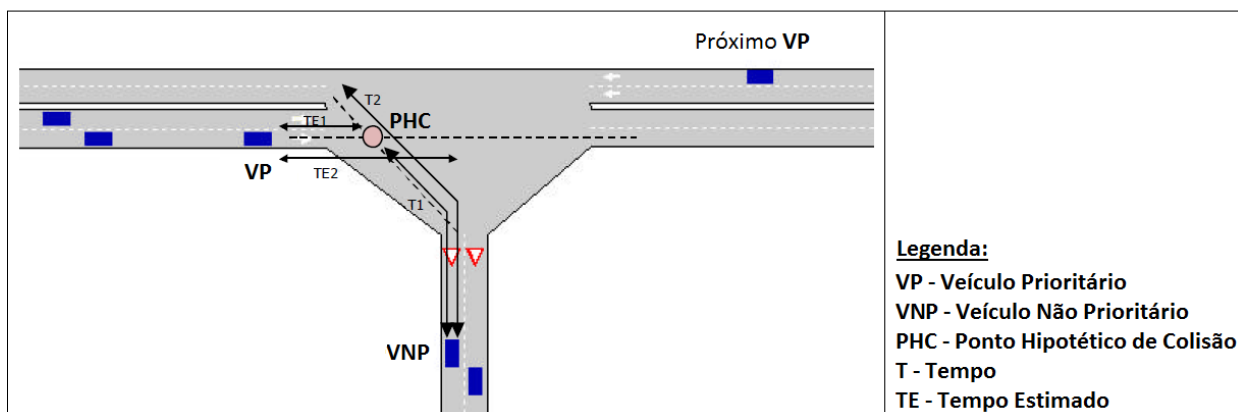


Figura 2.6 – Esquema de uma situação de possível cedência de prioridade (adaptado de TSS (2012a)).

Para determinar se um veículo que chega a um interseção com cedência de prioridade pode ou não atravessar é aplicado um algoritmo no qual são calculados o ponto hipotético de colisão, os tempos necessários e estimados (pelo veículo não prioritário) para cada veículo prioritário chegar a esse ponto, determinando se o veículo avança ou se deve ceder passagem, desacelerando, e, se necessário, parar. Apenas os veículos com prioridade que estejam em seções que estão total ou parcialmente até 100 metros de distância da interseção irão ser considerados pelo veículo não prioritário, como representado na Figura 2.7.

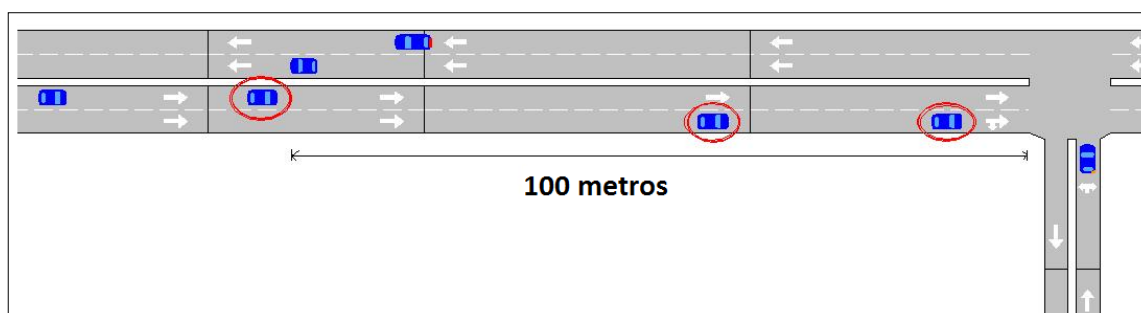


Figura 2.7 – Distância considerada para detetar veículos prioritários (adaptado de TSS (2012a)).

### 2.3.9 Submodelos

Apesar de bastante complexos, os modelos atrás descritos não conseguem, por si só, fazer uma representação de toda a realidade. Por esta razão existem vários submodelos e outros algoritmos que auxiliam os modelos principais a representar a realidade com a maior precisão possível. Alguns dos mais importantes são os seguintes:

- *Two lane car-following*;
- *Gap Acceptance* para o *Lane-changing*;
- *Valid target lanes – Dynamic Look Ahead*;

O submodelo *two lane car-following*, ou “seguimento” de duas vias, é usado para modelar o comportamento dos condutores em seções com duas ou mais vias adjacentes, e têm duas variações, consoante o caso que se esteja a modelar, o *two lane car-following* absoluto e relativo. O *two lane car-following* absoluto tem como objetivo modelar a influência de vias adjacentes no modelo de *car-following*. Sempre que um veículo percorre um *troço*, tem-se em consideração o número de veículos que seguem na via adjacente à direita, onde se praticam velocidades inferiores. Resumidamente, o modelo calcula uma nova velocidade máxima desejada de um veículo num determinado *troço*, que será então a utilizada no modelo de *car-following*. Por sua vez, o *two lane car-following* relativo prevê a possibilidade de um veículo que circula a uma velocidade elevada, *veículo rápido*, numa via à esquerda mais rápida, diminuir a sua velocidade na presença de veículos que circulam a uma velocidade baixa, *veículos lentos*, na via adjacente, à direita, antevendo assim que um deles possa mudar de via repentinamente ficando posicionado na sua frente, provocando uma potencial situação de travagem de emergência.

Para responder à questão “É possível mudar de via?” no modelo *lane-changing*, é aplicado o submodelo de *gap acceptance* para o *lane-changing*. Como já referido, este aplica-se para verificar se há um espaçamento suficiente grande na nova via para assegurar a mudança de via em completa segurança. A aceitação do espaçamento neste submodelo pode ser modificada por dois parâmetros, a percentagem de veículos que irá proceder a uma mudança de via imprudente, ou seja, sem um intervalo de espaço seguro (*imprudent lane changing*), e a sensibilidade para uma mudança de via imprudente (*sensitivity for imprudent lane changing – aggressiveness*), que está relacionada com a determinação do intervalo de espaço seguro (*Non safe gap*).

O submodelo de *Valid target lanes – Dynamic Look Ahead* (literalmente: vias alvo válidas – olhar em frente dinâmico) modela uma situação que é a da hipótese de um veículo não conseguir mudar de via a tempo e perder a saída seguinte pretendida. Para evitar esta situação é feito um cálculo de “vias alvo válidas” que depois entram na escolha de vias pelo veículo no modelo *lane-changing*, como que simulando o que na realidade é o conhecimento do condutor sobre que manobras efetuar para chegar à saída pretendida, incluindo a análise que este faz das condições do tráfego à sua volta. Este submodelo pretende evitar que os veículos percam a saída desejada, ficando na situação de “veículo perdido”, *lost vehicle*, o que pode trazer problemas no funcionamento e representação da simulação.

Também nos submodelos se verificam implicações de calibração, onde também a questão de qual o grau de precisão a ter nos vários parâmetros se coloca.

## 2.4 Considerações finais

A simulação a uma escala microscópica apresenta inúmeros desafios. Para uma modelação mais eficaz é necessário modelar todos os casos existentes na realidade, com modelos devidamente precisos mas ao mesmo tempo suficientemente flexíveis o suficiente para se adaptarem às mais diversas situações e problemas encontrados na realidade. Tendo sempre presente a importância fundamental dos micromodelos de base (seguimento, mudança de via, intervalo de aceitação), é aqui que muitas vezes se denota a também importância dos submodelos para vir completar os micro modelos de base, de modo a colmatar falhas em situações específicas.

Contudo, como se viu, quanto mais perto se chega deste objetivo de maior representação da realidade, maior é a quantidade de decisões a tomar e parâmetros para calibrar – o que pode levar a erros, não necessariamente grosseiros, no desenrolar dos processos de microssimulação, potencialmente com consequências negativas significativas ao nível da precisão e aplicabilidade dos resultados das modelações. Cresce aqui a necessidade de adoção de metodologias sistemáticas e controladoras de erros para o desenvolvimento de estudos e projetos, referentes também a qual o grau necessário de precisão necessário de cada parâmetro ou variável de *input*.

A maioria dos documentos, manuais para guia e padronização de procedimentos (FHWA, 2004; Highways Agency, 2007; Austroads, 2006; Punzo et al. 2012), deixam uma ideia subjacente: deve-se proceder a uma procura contínua de melhorias de processo e revisão de estratégias de controlo de erros adotada, para atingir uma maior eficiência na construção dos modelos, aplicando os recursos disponíveis onde eles são mais necessários. Assim, dar-se-á origem a resultados de estudos mais fiáveis e robustos, tanto para auxílio aos projetos em concreto, como para justificativo mais intuitivo e tomada de decisões. Este acompanhamento da evolução dos modelos e procedimentos são os desafios que iram continuar a pautar a microssimulação.

### 3. PARAMETROS DE CALIBRAÇÃO

Os valores associados aos diversos parâmetros incorporados nos modelos e submodelos de microssimulação assumem particular relevância nos resultados modelados. Estes podem ser parâmetros dos mais variados tipos. Podem ser relativos às características do condutor, do veículo ou da infraestrutura onde o veículo circula. Podem ainda ser relativos ao comportamento do condutor e dinâmica do veículo em si ou relativos a escolha de rotas pelo condutor.

#### 3.1 Identificação dos principais parâmetros de calibração

No *Aimsun* é feita uma categorização dos parâmetros de calibração segundo três grandes grupos, independentemente de quais os modelos onde entram: parâmetros globais, parâmetros locais, e parâmetros do tipo de veículo.

Os parâmetros globais afetam todos os veículos, qualquer que seja o seu tipo, quando circulam em qualquer ponto da rede. Os parâmetros locais são referentes a um determinado *troço*. Estes influenciam todos os veículos de todos os tipos que circulem nesse determinado *troço* da rede. Os parâmetros referentes ao tipo de veículo afetam todos os veículos de um certo tipo, por exemplo automóvel ligeiro, pesado de mercadorias ou autocarro, que circulem em qualquer ponto da rede.

##### 3.1.1 Parâmetros relativos ao comportamento do condutor

Na microssimulação, como já referido, a modelação do comportamento dos condutores representa uma das componentes fundamentais do modelo. Um dos parâmetros essenciais para tal é o tempo de reação do condutor (TR), também chamado na literatura de tempo de percepção-resposta. O princípio básico é que, para qualquer condutor, a informação demora tempo a processar (AASHTO, 2001). Existem variadas definições deste parâmetro, contudo a mais usual vem da literatura clássica.

O tempo de reação é um intervalo que começa quando algum objeto ou condição entra no campo visual do condutor e acaba quando este inicia uma resposta (e.g., o pé no pedal do travão e/ou as mãos começarem a virar o volante) (Dewar & Olson, 2007). Este parâmetro pode ter grande variabilidade dependente de diversos fatores. O tempo de reação pode variar de cidade para cidade, de país para país, de qual o tipo de infraestrutura que se está a modelar (urbana, suburbana, interurbana/regional), de qual o motivo da viagem, assim como pelo grau

de agressividade do condutor, i.e., quanto mais agressivo é o condutor, menores serão os valores do tempo de reação, entre outros fatores.

O *Aimsun* distingue três diferentes tempos de reação: o *tempo de reação*, o *tempo de reação em paragem* e o *tempo de reação em sinal luminoso*. Estes são os tempos de reação que entram no modelo de *car-following*, consoante a situação em que se encontra cada veículo.

O *tempo de reação*, ou tempo de reação em andamento, é o tempo que um condutor demora a reagir a uma mudança de velocidade do veículo líder. A AASHTO (2001) refere, baseando-se em estudos de campo, que o tempo de reação para um evento esperado, ou mudança prevista, atinge uma média de 0.6 segundos, sendo que alguns condutores chegam a demorar 2.0 segundos. Para eventos inesperados o tempo de reação aumenta cerca de 35%, sendo que para tomar uma decisão ou ação inesperada alguns condutores demoram 2.7 segundos a reagir. Uma decisão complexa com várias alternativas poderá demorar consideravelmente mais tempo (segundos) que uma decisão simples. Tal é mostrado na Figura 3.1.a) para os valores medianos e na Figura 3.1.b) para os valores referentes ao percentil 85. As figuras quantificam a quantidade de informação a ser processada em *bits*. Tempos de processamento mais longos diminuem o tempo disponível para execução de outras tarefas e aumentam as hipóteses de erro nas decisões a tomar.

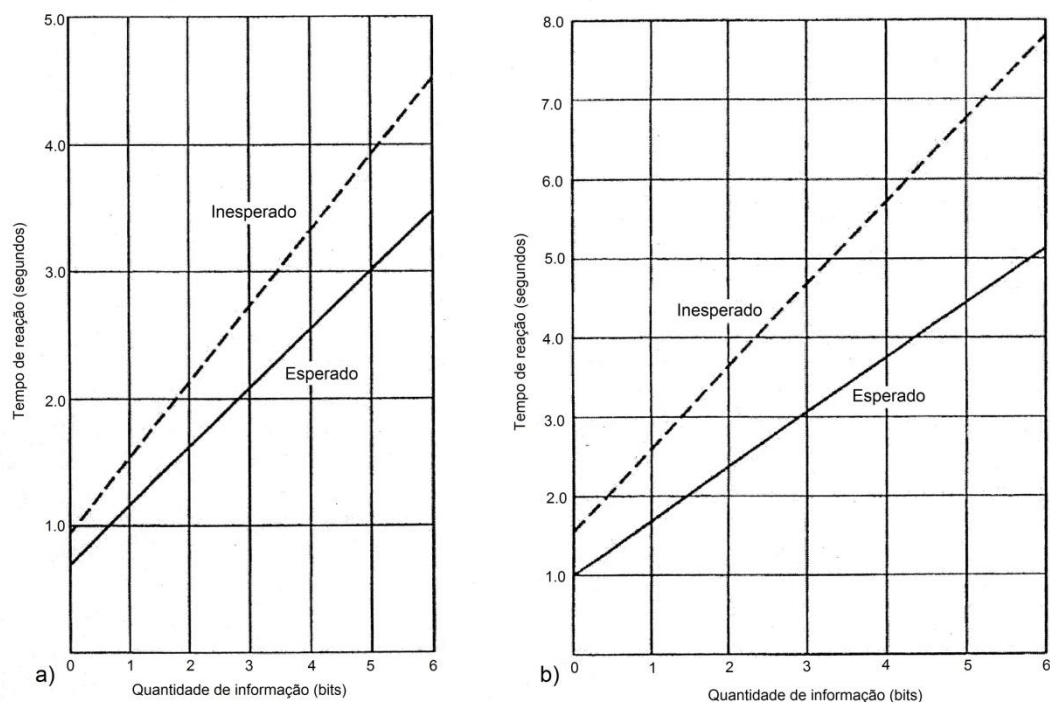


Figura 3.1 – Valores dos tempos de reação a eventos esperados e inesperados (adaptado de AASHTO (2001)).

a) Mediana.

b) Percentil 85.



No *Aimsun* o valor por defeito é de 0.75 segundos, e poderá ser em modo fixo ou variável. Caso seja fixo, este assume o mesmo valor que o *passo de simulação* e é o mesmo valor para todos os veículos, i.e., um parâmetro global. Se for variável é definido para cada tipo de veículo, sendo, portanto um parâmetro do tipo de veículo, e só pode ser igual ao passo de simulação, ou um múltiplo (superior) deste. Sendo variável, o *tempo de reação* também pode ser definido segundo uma função discreta probabilística. Podem ser definidos vários valores para o *tempo de reação*, definindo-se a probabilidade de cada um, como mostra a Figura 3.2. O Austroads<sup>2</sup> (2007) recomenda o uso de 1.00 segundo para o valor do *tempo de reação*, com um *passo de simulação* com o valor de 0.50 segundos.

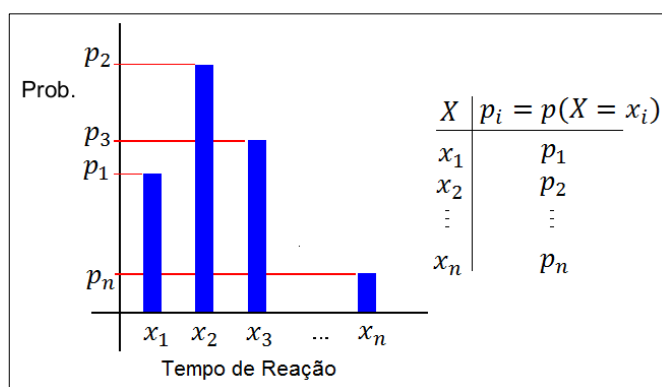


Figura 3.2 – Tempo de reação segundo uma função discreta probabilística (adaptado de TSS (2012a))

O *tempo de reação em paragem* é o tempo que um condutor, quando o veículo está parado, demora a reagir à aceleração do líder. O *tempo de reação em sinal luminoso* aplica-se quando o veículo está parado e é o primeiro veículo em frente a um sinal luminoso, sendo o tempo que o condutor demora a reagir à mudança do sinal para verde. Bonneson (1992) refere, com base em vários estudos, que numa fila em frente a um sinal luminoso, quando o sinal fica verde, o tempo de passagem entre cada veículo, ou *headway*, é bastante maior para o primeiro veículo na fila, diminuindo bastante para o segundo veículo e estabilizando a partir do quinto, como se mostra na Figura 3.3. O *headway* está dependente de outros fatores que não só o tempo de reação, mas também as capacidades de aceleração do veículo, a agressividade do condutor, i.e., qual o grau de uso pelo condutor da capacidade de aceleração disponível, e o espaço que um veículo deixa entre si e o veículo da frente. Apesar da influência de todos estes fatores, podemos assumir uma simplificação correspondente a assumir como constantes para cada veículo a capacidade de aceleração e a agressividade/grau de aceleração do condutor e

<sup>2</sup> Este relatório técnico do Austroads foi elaborado tendo em conta estudos efetuados na Austrália. A sua aplicação noutros locais deve ser efetuada com a devida precaução.

ainda o espaço que deixa entre si e o veículo da frente. Assim podemos denotar uma aproximação à distinção dos dois tempos de reação atrás enunciados feita pelo *Aimsun*.

Com resultados análogos, Rodger J. Koppa, no capítulo “Human Factors” em “Revised Monograph on Traffic Flow Theory: 1975-2012” (FHWA/TRB, 2012), refere que o tempo de reação de um condutor numa fila de trânsito varia entre os valores de 1.06 e 1.41 segundos (percentil 99). Refere ainda que os valores observados para o *tempo de reação em sinal luminoso* têm uma média de 1.30 segundos, com valores de 1.50, 2.50 e 2.80 segundos referentes aos percentis 85, 95 e 99, respetivamente. Apesar da aparente diferença nos tempos, no *Aimsun* o *tempo de reação em paragem* e o *tempo de reação em sinal luminoso* assumem por defeito o mesmo valor: 1.35 segundos, e podem ser fixos e variáveis, tal como o *tempo de reação*. No caso de serem variáveis, terão obrigatoriamente de ter valores iguais ou superiores ao *tempo de reação*. Para o *tempo de reação em paragem*, o Austroads (2007) recomenda o uso de 1.35 segundos, mas para casos em que o tempo de verde é bastante pequeno recomenda o valor de 1.05 segundos, assumindo que os condutores se sentirão mais pressionados a não perder as oportunidades de prosseguir a marcha.

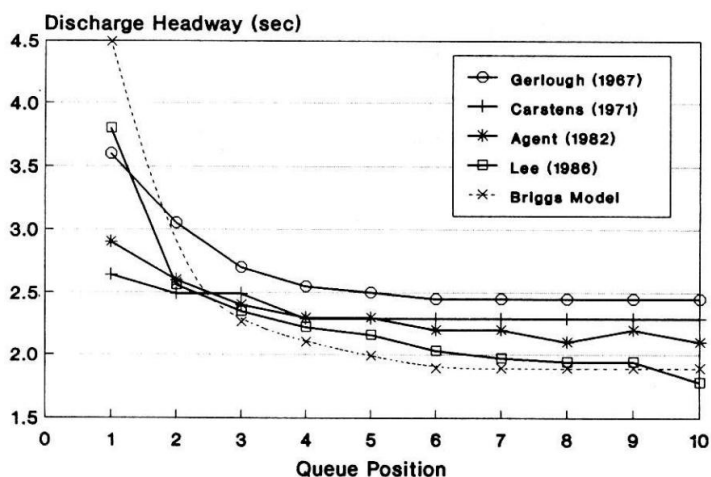


Figura 3.3 – Comparação de vários estudos sobre as distâncias de saída de veículos em filas (Bonneson, 1992).

Também importante para a modelação de filas, é o parâmetro *distância mínima entre veículos*. Esta é a distância mínima que um veículo deixa entre si e o veículo que se encontra à sua frente numa situação de paragem numa fila de trânsito. É um parâmetro do tipo de veículo, e segue uma distribuição normal truncada. Para o tipo de veículo mais comum, o veículo ligeiro de passageiros, “car” no *Aimsun*, os valores por defeito são: média de 1.00 metro, desvio padrão de 0.30 metros, com um mínimo de 0.50 metros e um máximo de 1.50 metros. Este parâmetro entra no modelo de *car-following* de modo indireto, por ser parte do *comprimento efetivo de um veículo*.

### 3.1.2 Parâmetros relativos à dinâmica dos veículos

Os parâmetros, *aceleração* e a *desaceleração* representam alguns dos mais relevantes parâmetros de caracterização da dinâmica dos veículos. Apesar de caracterizarem o comportamento dos veículos, representam igualmente o comportamento dos condutores, pelo que o modelo não faz essa distinção e aplica essas características como parâmetros do tipo de veículo. No *Aimsun* estes parâmetros têm lugar como *aceleração máxima*, *desaceleração normal* e *desaceleração máxima*, sendo todos aplicados no modelo *car-following*, e o primeiro e último também aplicados no modelo *gap-acceptance*.

A *aceleração máxima* é a aceleração que um veículo pode atingir em qualquer circunstância, em qualquer ponto da rede. É um valor não fixo, atribuído de forma aleatória e segue uma distribuição normal truncada. Para o tipo de veículo mais comum, o veículo ligeiro de passageiros, os valores por defeito são: média de  $3 \text{ m/s}^2$ , desvio padrão de  $0.2 \text{ m/s}^2$ , com um mínimo de  $2.6 \text{ m/s}^2$  e um máximo de  $3.4 \text{ m/s}^2$ . O Austroads (2007) recomenda usar  $2.4 \text{ m/s}^2$  como valor médio para este parâmetro. Para uma melhor perceção do enquadramento destes valores apresenta-se no Quadro 3.1 valores de aceleração de alguns automóveis existentes no mercado.

Quadro 3.1 – Valores de acelerações máximas (iniciais) de alguns veículos comuns (dados dos fabricantes).

| Veículo                         | Tempo 0 - 100km/h [seg.] | Aceleração [ $\text{m/s}^2$ ] |
|---------------------------------|--------------------------|-------------------------------|
| Audi A4 1.9 TDI (ano 2001)      | 9.9                      | 2.8                           |
| Opel Astra 1.4 i (ano 2004)     | 13.7                     | 2.0                           |
| Renault Clio 1.5 dCi (ano 2005) | 12.4                     | 2.4                           |

A *desaceleração normal* é a máxima desaceleração que um veículo usa em condições normais, pela não aceleração ou pela travagem, enquanto que a *desaceleração máxima* é a máxima desaceleração que um veículo pode utilizar em condições especiais, como travagens de emergência. Bastos Silva (2004) cita vários estudos, os quais referem que cerca de 94% dos veículos ligeiros de passageiros podem atingir taxas de desaceleração superiores a  $-7.6 \text{ m/s}^2$ , ao passo que apenas 13% dos veículos pesados conseguem atingir estas taxas. O mesmo autor refere também, com base noutros estudos, que as taxas de desaceleração típicas variam entre os  $-4.6 \text{ m/s}^2$  e  $-7.0 \text{ m/s}^2$ , aproximando-se em média dos  $-5.5 \text{ m/s}^2$ , como resposta para eventos não esperados, assim como que a relação travagem inesperada versus travagem esperada foi estimada em 1.22.

Os dois parâmetros de desaceleração são também um valor não fixo, atribuído de forma aleatória e seguem uma distribuição normal truncada. Para o tipo de veículo mais comum, o veículo ligeiro de passageiros, os valores por defeito para a *desaceleração normal* são: média

de  $-4.0 \text{ m/s}^2$ , desvio padrão de  $-0.25 \text{ m/s}^2$ , com um mínimo de  $-3.5 \text{ m/s}^2$  e um máximo de  $-4.5 \text{ m/s}^2$ . O Austroads (2007) recomenda usar  $-4.0 \text{ m/s}^2$  como valor médio. Enquanto que para a *desaceleração máxima*, os valores por defeito são: média de  $-6.0 \text{ m/s}^2$ , desvio padrão de  $-0.50 \text{ m/s}^2$ , com um mínimo de  $-5.0 \text{ m/s}^2$  e um máximo de  $-7.0 \text{ m/s}^2$ . O Austroads (2007) recomenda usar  $-6.0 \text{ m/s}^2$  como valor médio.

### 3.1.3 Parâmetros de perturbação dos comportamentos padrão do condutor

Os comportamentos de um condutor são por norma traduzidos por valores padrão, tendências empíricas registadas a partir de um vasto número de estudos experimentais ao longo dos anos. Contudo, na realidade observa-se que os condutores podem ter comportamentos fora do chamado “padrão normal”. Para esse efeito, são introduzidas no *Aimsun* variáveis que afetam esses comportamentos padrão dos condutores. Os mais importantes destes parâmetros são a *aceitação de velocidade*, a *mudança de via imprudente*, o *tempo máximo de cedência de prioridade* e a variação deste.

A *aceitação de velocidade* vai influenciar a *velocidade máxima desejada* assumida pelo condutor, i.e., vai definir qual o grau de aceitação da velocidade máxima legal da via onde se encontra, por parte do condutor. Na generalidade o cumprimento ou não dos limites legais de velocidade é um assunto importante. Segundo Sytze A. Rienstra e Piet Rietveld (Rienstra & Rietveld, 1996) os limites de velocidade legais são transgredidos virtualmente por todos os condutores. Estudo realizados até à data, indicam que na União Europeia 80% dos condutores transgredem a velocidade limite em autoestrada, sendo que em estradas com via dupla ainda se observa este comportamento em 50% dos condutores. Neste estudo, efetuado na Holanda, é analisada a perceção da velocidade pelos condutores, e conclui-se que a razão principal pela qual estes transgridem os limites de velocidade é porque tal acontece de maneira inconsciente, e a segunda principal razão é para chegarem mais rápido ao destino, poupando tempo. Por outro lado, a principal razão pela qual os condutores cumprem os limites é por questões de segurança, sendo que é dada uma importância muito menor a efeitos externos, como poluição atmosférica ou sonora.

No *Aimsun* o parâmetro *aceitação de velocidade* é adimensional e com valor sempre positivo. É atribuído um valor a cada veículo, segundo uma distribuição normal truncada. Caso esse valor seja superior à unidade, o condutor vai assumir como a sua *velocidade máxima desejada* um valor superior ao máximo legal, se for igual à unidade vai assumir o mesmo valor que a máxima legal, e se for inferior à unidade vai assumir uma *velocidade máxima desejada* inferior ao limite legal. Este é um parâmetro do tipo de veículo, e para o mais comum, o veículo ligeiro de passageiros, “car” no *Aimsun*, os valores por defeito são: média de 1.10,

desvio padrão de 0.10, com um mínimo de 0.90 e um máximo de 1.30. É aplicado nos modelos *car-following* e *gap-acceptance*.

A *mudança de via imprudente* é também referente a cada tipo de veículo, e define a percentagem de veículos que irão aplicar uma mudança de via com um espaçamento não seguro, no modelo de *lane-changing*. O espaçamento irá diminuindo, desde o espaçamento seguro, até ao comprimento do veículo.

O *tempo máximo de cedência de prioridade*, ou *maximum give-way time*, é um parâmetro do tipo de veículo. Este é o tempo máximo que um veículo fica parado antes de se tornar mais agressivo. Mais especificamente, quando o veículo está numa situação de cedência de prioridade numa interseção é aplicado o modelo de *gap-acceptance*, ou no caso em que o veículo quer mudar de via onde circula, o modelo *gap-acceptance* para o *lane changing*. No primeiro caso, quando um veículo esteve parado durante um período superior a este tempo máximo, vai-se tornar mais agressivo e vai conseqüentemente reduzir as margens de aceitação de intervalo para efetuar a manobra desejada. Os valores por defeito no *Aimsun* são: média de 10.0 segundos, desvio padrão de 2.5 segundos, com um mínimo de 5.0 segundos e um máximo de 15.0 segundos.

Influenciando este último, existe também o parâmetro da variação do tempo máximo de cedência de prioridade, ou *maximum give-way time variability*. Este é um parâmetro local que influencia todos os veículos que circulam em determinado *troço*. É um valor absoluto que aumenta ou diminui o valor do tempo máximo de cedência de prioridade de cada veículo. Ao contrário dos parâmetros anteriores, este não é introduzido no modelo com intuito de modelar o comportamento do condutor, mas sim para calibrar localmente situações especiais de cedência de prioridade.

Também outro parâmetro local é a *variação do tempo de reação*. Este toma um valor inteiro que aumenta ou diminui o tempo de reação de todos os veículos que circulem em determinado *troço*. À semelhança do parâmetro anterior, este não é introduzido no modelo com intuito de modelar o comportamento do condutor, mas sim para calibrar localmente situações especiais. O resultado final da variação do tempo de reação é então calculado da seguinte forma:

$$TR_{v,s} = TR_v + VTR_s * \text{passo de simulação}$$

Onde:

$TR_{v,s}$  – Tempo de reação do veículo v no *troço* s;

$TR_v$  – Tempo de reação do veículo v;

$VTR_s$  – Variação do tempo de reação no *troço* s.

### 3.1.4 Parâmetros relativos ao funcionamento da simulação e à recolha de resultados

Fundamental na microssimulação, o *passo de simulação* pode afetar não só o esforço computacional mas também alguns resultados da simulação, como a capacidade de seções, por exemplo. Pelo efeito que têm no funcionamento da simulação, quanto menor for o passo de simulação, maiores serão os valores de capacidade. Com um menor *passo de simulação* os condutores conduzem a uma menor distância do líder, conseguem encontrar os *espaçamentos* desejados de modo mais fácil, podem acelerar mais cedo, têm mais oportunidades de entrar na rede (quando cada veículo é gerado num centróide), etc. (TSS, 2012b).

Para a recolha de alguns dados da simulação, como comprimentos de filas, nem sempre as abordagens tradicionais são possíveis de implementar. O Highway Capacity Manual (TRB, 2000) define fila como “uma série de veículos, bicicletas ou pessoas dispostos em linha, que aguardam oportunidade para utilizar o sistema, na qual o fluxo da frente determina a velocidade média de toda a fila. Veículos ou pessoas que circulam a baixa velocidade que se juntam ao fim da fila, são normalmente considerados parte desta.” Como refere a FHWA (2004), estas definições não são fáceis de implementar num contexto de microssimulação, já que as ideias de “oportunidade para utilizar o sistema” e “circulam a baixa velocidade” são difíceis de definir. Desta forma, o *Aimsun* tem dois parâmetros para este efeito, a *velocidade de entrada em fila* e a *velocidade de saída de fila*. Estes são os parâmetros que têm influência direta na recolha dos resultados estatísticos de comprimentos de filas. Assim cada um define um valor de velocidade que funciona como patamar. Quando um veículo está em desaceleração e atinge a *velocidade de entrada em fila*, a partir daqui este é considerado como estando numa fila. Quando o mesmo veículo está em aceleração e ultrapassa o valor da *velocidade de saída de fila*, considera-se que o veículo abandonou a fila. Os valores por defeito são 1m/s e 4m/s para entrada e saída de fila, respetivamente.

## 3.2 Avaliação do impacto dos parâmetros de calibração

Neste capítulo fez-se uma apresentação de alguns dos mais importantes parâmetros dos modelos de microssimulação, e em especial os dos modelos que integram o *Aimsun*. Em resultado coloca-se a questão de como estes parâmetros influenciam o comportamento dos modelos e, portanto, do *Aimsun*. A TSS apresenta de modo muito breve alguns exemplos da influência de parâmetros (TSS, 2012a), que se apresentam (em parte) de seguida:

- O *tempo de reação* (TR) influencia: a capacidade de *troços* (menor TR → maior capacidade);

- O *tempo de reação em paragem* (TRP) influencia: a capacidade do “para-arranca” (menor TRP → maior capacidade);
- A *velocidade de entrada e saída de fila* influencia: as estatísticas referentes a filas e o comportamento dos veículos em “zona amarela”;
- O limite de velocidade (de um *troço*) influencia: a velocidade média (maior limite de velocidade → maior velocidade média no *troço*) e os tempos de viagem (maior limite de velocidade → menores tempos médios de viagem no *troço*);
- A *velocidade máxima desejada*, a *aceleração máxima*, a *desaceleração normal*, a *desaceleração máxima* e a *aceitação de velocidade* influenciam: a velocidade, tempo de viagem, saída de filas, mudanças de via, etc;
- A *distância mínima entre veículos* (DMV) influencia: capacidades (menor DMV → maior capacidade) e comprimentos de fila (menor DMV → menor comprimentos de fila);

A escolha dos parâmetros para análise baseou-se nas características do modelo de referência (apresentado à frente em 4.2). Este simula uma única interseção, regulada unicamente por sinais luminosos, e com *troços* de pequena extensão. Devido a não ser possível a cada condutor escolha de rota, não se considerou a análise dos respetivos parâmetros (já não apresentados em pormenor devido a essa razão). Também devido à não existência de nenhum cruzamento com cedência de prioridade e aos troços de pequena extensão (e a certeza de vias-alvo por parte dos condutores) excluíram-se os parâmetros exclusivos do *gap-acceptance* e exclusivos do *lane-changing*, respetivamente. Considerou-se adequada esta escolha de parâmetros.

Na seção 3.1 apresentaram-se uma grande variedade dos valores referidos na bibliografia e recomendados para os vários parâmetros. Esta alargada gama de valores apresentados traz de novo a questão da importância de se ter uma noção bastante boa do potencial impacto negativo nos *outputs* dos modelos, resultante da precisão (ou imprecisão) na quantificação destes parâmetros e a necessidade de se definirem níveis mínimos de precisão desejáveis. Com isto, apresentam-se no capítulo seguinte todas as análises e considerações tomadas para dar resposta a essas questões e necessidades.

## **4. AVALIAÇÃO DO EFEITO DOS PARÂMETROS DE CALIBRAÇÃO NA QUALIDADE DOS RESULTADOS**

### **4.1 Introdução**

A avaliação do impacto da introdução de erros nos parâmetros de calibração é uma parte particularmente importante do trabalho aqui presente. Neste capítulo faz-se a exposição de todo o processo de desenvolvimento do trabalho efetuado, com apresentação da escolha do modelo de base a utilizar para as análises, e as considerações assumidas. Achou-se importante uma primeira clarificação dos estudos, ou análises, a efetuar com posterior identificação dos indicadores de desempenho mais importantes e os mais indicados para análise de resultados. Introduz-se, finalmente, na seção 4.5 uma grande quantidade de resultados apresentados na forma de gráficos, já que se julga que é esta a forma mais eficaz de se avaliar os resultados.Ã

### **4.2 Construção do modelo**

#### **4.2.1 Escolha do modelo de estudo**

Para a realização do presente trabalho, pretendeu-se escolher um Estudo de Caso que fosse adequado para desenvolver um modelo de referência. Foi escolhido um caso de estudo de uma só interseção em meio urbano, bastante solicitada, pela disponibilidade de dados recolhidos no campo recentemente. Assim, desta forma, conseguiu-se também limitar a variância do modelo relativa à escolha de caminhos pelos condutores, já que tal não acontece neste modelo, permitindo assim um maior controlo na avaliação dos resultados obtidos. O Estudo de Caso selecionado foi a interseção do Arnado – Auto Industrial, na baixa da cidade de Coimbra. Na Figura 4.1 pode-se ver o enquadramento do local.





Figura 4.1 – Fotografia de satélite do enquadramento do local de estudo.

#### 4.2.2 Recolha de dados de campo e construção do modelo no Aimsun

Os dados disponíveis foram registados, no âmbito de outros estudos, no dia 21 de Novembro de 2012, na hora de pico da manhã, entre as 7horas e 30 minutos e as 9horas e 30 minutos. Foram registados os veículos por tipo (veículo ligeiro, autocarro, e veículo pesado de mercadorias) e em intervalos de 15 minutos. As contagens foram efetuadas tendo por base a origem (O) e o destino (D) de cada veículo, tendo resultado num conjunto de matrizes O/D para cada intervalo de 15 minutos e para cada tipo de veículo. Como dados de calibração, foi registado o comprimento das filas de espera de veículos remanescentes imediatamente depois da mudança do sinal luminoso de verde para vermelho, a cada 15 minutos. A Figura 4.2 mostra a planta da interseção com mais detalhe.

No período de contagens registaram-se um total de 3970 veículos, sendo destes 3574 veículos ligeiros, 323 autocarros e 73 veículos pesados de mercadorias, com um equivalente total de 4366 UVL (Unidades de veículos ligeiros equivalentes). Foi verificado que o período mais carregado ocorreu entre as 8h15m e as 9h15m.

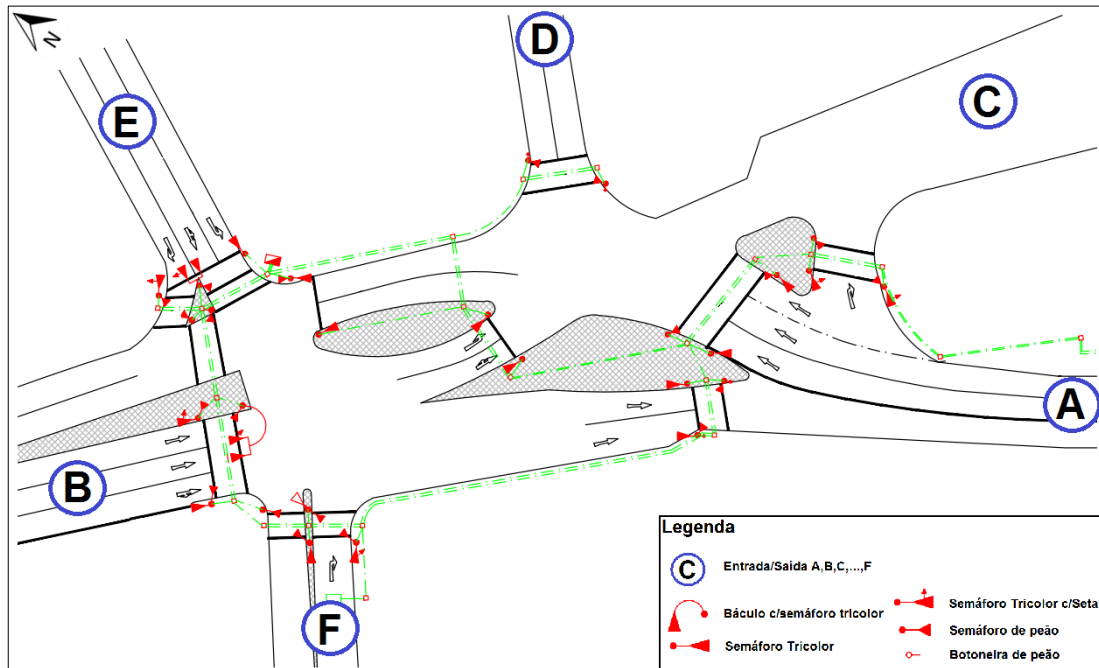


Figura 4.2 – Planta de semaforização da interseção analisada (s/ escala).

Procedeu-se então à construção do modelo *Aimsun*, representado na Figura 4.3, o que passou pela definição das vias, nós, centróides e plano semafórico. De seguida foi introduzida a procura de tráfego registada em forma de matrizes O/D. Finalmente, procedeu-se à fase de calibração do modelo.

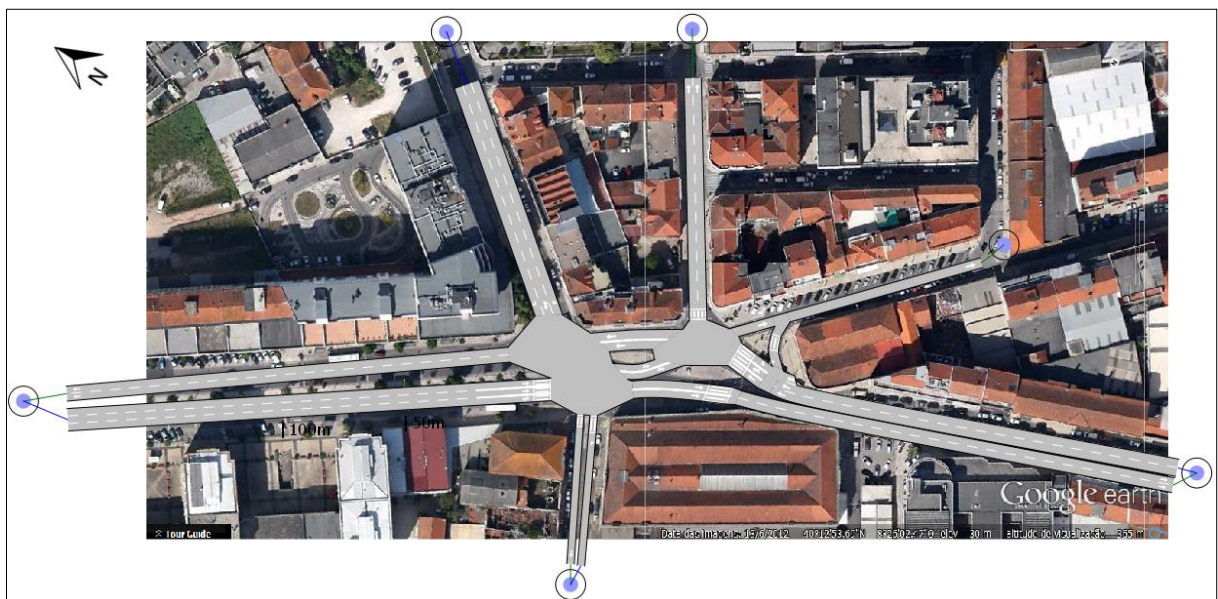


Figura 4.3 – Fotografia de satélite do local de estudo, com a sobreposição do modelo *Aimsun*.

### 4.2.3 Calibração e validação do modelo

A *calibração* de modelos de simulação microscópica é um tema amplamente discutido, aprofundado e em constante desenvolvimento, de importância muito relevante, como já descrito nos capítulos anteriores. A FHWA (2004) refere que o objetivo da *calibração* é “melhorar a capacidade do modelo reproduzir com precisão as condições locais de tráfego”. A mesma fonte indica que é essencial dividir o processo de calibração numa série de passos sequenciais e lógicos, definindo uma estratégia de calibração. Primeiramente, e por questões práticas, os parâmetros devem ser divididos em duas categorias gerais: os que o modelador tem a certeza dos valores e não os deseja ajustar, e os que o modelador não tem certeza da precisão e está disposto a ajustar. A estratégia de calibração recomendada é a seguinte (FHWA, 2004):

1. Calibrar parâmetros relacionados com a capacidade;
2. Calibrar parâmetros relacionados com escolhas de rotas;
3. Calibrar o desempenho global do modelo.

A calibração dos parâmetros relacionados com a capacidade desenvolve-se em duas fases: a calibração global e a calibração e ajustamentos locais. Aqui ressalva-se que os ajustamentos locais são frequentemente necessários depois da calibração global, contudo, estes devem ser usados com cuidado e com limitações, apenas como pequena e pontual afinação.

Já Hollander e Liu (2008), apresenta um estudo onde aplica várias técnicas de calibração com diferentes abordagens e *softwares*. A metodologia aconselhada é similar à apresentada, contudo a primeira abordagem na classificação dos parâmetros é ligeiramente diferente. É recomendada uma revisão inicial dos parâmetros do modelo de microssimulação que está a ser usado, e fazer uma divisão nos seguintes grupos (Hollander & Liu, 2008):

1. Parâmetros em que os valores são relativamente fáceis de medir diretamente (e.g. comprimento médio dos veículos ou tempo médio de embarque por passageiro num autocarro);
2. Parâmetros em que os valores podem ser retirados de estudos anteriores aplicáveis ao tempo e lugar que está a ser modelado;
3. Parâmetros em que a sua influência nos resultados finais do modelo podem ser considerados negligenciáveis. Para verificar se um parâmetro pertence a este grupo, o modelo deve ser corrido várias vezes fazendo variar a gama de valores do parâmetro, sem variar os outros parâmetros;
4. Parâmetros que são inapropriados para ajuste devido à natureza dos dados de entrada no modelo (recolha de campo). Por exemplo, se os dados são recolhidos na totalidade

numa via rápida onde não circulam autocarros, não é adequado o uso de aceleração do tipo de veículo autocarro como parâmetro de calibração;

5. Todos os restantes parâmetros que não se incluíram nos grupos acima. Os modeladores deverão tentar incluir também estes parâmetros no grupo de parâmetros a calibrar.

Para proceder à calibração do modelo escolheu-se como parâmetros de calibração globais o *tempo de reação* e o *tempo de reação em paragem*. Contudo, no decorrer do processo de calibração foi bastante difícil aproximar o comportamento do modelo da realidade observada (análise pelo comprimento de filas). Verificou-se que o maior problema de congestionamento se encontrava na entrada B, sendo que as entradas A e E, onde se verificaram problemas de congestionamento nas observações de campo, não mostraram qualquer tipo de congestionamento no modelo. Assim prosseguiu-se para o ajustamento de parâmetros locais referentes à entrada B, para equilibrar o comportamento aí observado com o comportamento nas entradas A e E. Para tal adotou-se como parâmetro adequado a variação do tempo de reação, descrito no capítulo anterior. Durante o ajustamento deste verificou-se novamente uma significativa dificuldade na aproximação ao comportamento da entrada B, tendo-se que variar o parâmetro local escolhido com um valor consideravelmente grande e irrealista.

Então chegando a este ponto, tinha-se uma grande alteração em relação aos valores por defeito dos parâmetros globais e locais escolhidos, e sem grandes melhorias na aproximação à realidade, acrescido de se estar a divergir em relação às metodologias de calibração recomendadas. Relembrando que o objeto de estudo é primeiramente assumir uma “realidade” base representativa de situações correntes, não tendo de ser obrigatoriamente a observada no campo num caso concreto, os esforços para calibração efetuados não são assim tão importantes, sendo potencialmente mais proveitoso ter um modelo da “realidade” base com todos os parâmetros com os valores por defeito, para posteriormente proceder à introdução de erros, independentemente de qual a solução para ajustar o modelo de modo a simular a realidade observada.

Ainda assim, no modelo com todos os parâmetros com os valores por defeito, os comprimentos de filas não eram significativos, sendo importante o serem para melhor comparar o efeito de introdução de erros. Para este efeito carregou-se a rede com mais 10% de veículos ligeiros (110% da matriz ao invés de 100%), resultando, no conjunto das entradas no cruzamento, num total de 4325 veículos, sendo destes 3929 veículos ligeiros, 323 autocarros, e 73 veículos pesados de mercadorias, com um equivalente total de 4721 UVL.

Foi ainda avaliada a necessidade de fazer a introdução de erros num modelo com o período de simulação de duas horas (7h30 – 9h30). Visto que o período mais carregado foi entre as 8h15m e as 9h15m, considerou-se adequado fazer a simulação no período 8h00-9h15. Para inicializar a simulação neste período com a rede carregada (com veículos a circular) optou-se por usar um *estado inicial*. Para tal simulou-se o período das 7h30-8h00. Foram feitas seis corridas e escolheu-se a que mostrou ter o maior número de indicadores de performance com valores medianos, em relação às outras.

Em síntese, foi adotado um modelo com período de simulação das 8h00 às 9h15, com um carregamento das matrizes O/D dos veículos ligeiros majorada a 110%, e as reais de autocarros e veículos pesados de mercadorias, um *estado inicial* resultante de simulação das 7h30 às 8h00, e com todos os parâmetros com os seus valores por defeito. Este é o modelo adotado como aquele que representa a “realidade” de referência e que corresponde a um elemento infraestrutural que poderia existir na realidade. De notar que a partir deste ponto considerou-se o carregamento final da matriz O/D apresentado como o carregamento a 100%, e denominado como o “carregamento de referência”.

### 4.3 Análise sistemática de erros de quantificação

#### 4.3.1 Estudos com erros isolados

Para verificar o comportamento do modelo relativamente aos erros introduzidos foram selecionados os parâmetros que pudessem ter um efeito potencialmente maior nos resultados finais observados. Um dos parâmetros mais importantes em qualquer processo de calibração de um modelo é, como visto antes, o *tempo de reação*. Sendo um erro bastante comum em processos de calibração, a primeira análise efetuada passou pela introdução de erros no parâmetro *tempo de reação*, definido no modo fixo, i.e., com o mesmo valor que o passo de simulação (tal como detalhado em 3.1.1). O intervalo de variação foi assumido entre o mínimo valor do *tempo de reação* de 0.50 segundos e o máximo de 1.5 segundos, com variação dos valores em incrementos de 0.05 segundos. Esta é a análise 1.

Importantes na modelação de filas são os parâmetros *tempo de reação em paragem* (TRP) e *tempo de reação em sinal luminoso* (TRSL). Podemos distinguir entre as relações e variações dos parâmetros que é permitido regular pelo *Aimsun*, e as relações e variações que existem entre estes segundo a bibliografia analisada.

Em 3.1.1 foi identificada e justificada a existência comum de diferenças entre os valores reais do TRP e do TRSL. Apesar disso, considera-se que é uma aproximação suficientemente boa

considerar o mesmo valor para os dois parâmetros, já que a diferença se vai diluir no conjunto dos veículos que formam uma fila, e são os resultados e estatísticas desse resultado que interessa estudar. Assim assumiram-se como valores médios 1.35s tanto para o TRP como para o TRSL, os mesmos que os valores por defeito no *Aimsun* para os dois parâmetros.

Para introdução de erro, foram variados estes dois parâmetros na gama de valores [0.90 ; 2.70], com incrementos de 0.09 seg., cumprindo o princípio de variação mínima em incrementos de 10% do intervalo total de valores. Esta é a análise 2.

Também potencialmente importante na modelação de filas é o parâmetro *distância mínima entre veículos*. Segundo os valores apresentados em 3.1.1, optou-se por variar o valor médio deste parâmetro, para os veículos ligeiros de passageiros, no intervalo [0.5 ; 2.0] metros com incrementos de 0.1 metros mantendo um desvio padrão de 0.3 metros, o mínimo toma o valor médio subtraindo 0.5 metros, e o máximo o valor médio somando também 0.5 metros. Esta é a análise 3.

Outro parâmetro selecionado foi a *aceleração máxima*. Variou-se o valor deste parâmetro, para os veículos ligeiros de passageiros, no intervalo [2.0 ; 4.0] m/s<sup>2</sup>, com incrementos de 0.2 m/s<sup>2</sup>, e a distância aos valores mínimo e máximo de 0.4 m/s<sup>2</sup>. Esta é a análise 4.

Resumem-se estas quatro análises no Quadro 4.1.

Quadro 4.1 – Intervalos de variação para introdução de erros nos parâmetros escolhidos, individualmente.

| Análise | Parâmetro                         | Unidade          | Intervalo de variação | Incremento |
|---------|-----------------------------------|------------------|-----------------------|------------|
| 1       | Tempo de reação                   | segundo          | [ 0.5 ; 1.5 ]         | 0.05       |
| 2       | Tempo de reação em paragem        | segundo          | [ 0.90 ; 2.70 ]       | 0.09       |
|         | Tempo de reação em sinal luminoso | segundo          | [ 0.90 ; 2.70 ]       | 0.09       |
| 3       | Distância mínima entre veículos   | metro            | [ 0.5 ; 2.0 ]         | 0.10       |
| 4       | Aceleração máxima                 | m/s <sup>2</sup> | [ 2.0 ; 4.0 ]         | 0.20       |

#### 4.3.2 Estudos com combinação de erros

No estudo de erros isolados está-se a assumir a introdução de erros nos modelos feita de forma isolada e independente. Contudo, tal tende a não ser o que acontece em muitas situações, ou até talvez não fazer sentido variações significativas de alguns parâmetros, enquanto se mantêm outros inalterados, sentindo-se assim a necessidade de avaliar o potencial impacto resultante da combinação simultânea de erros em diferentes parâmetros, assumindo-se, portanto, que possa haver efeitos de potenciação ou mitigação de efeitos, resultantes da existência de inter-dependências entre efeitos. Note-se, ainda, que o estudo da resposta do

modelo à introdução de erros isolados poderá esconder efeitos da variância de outros parâmetros (Punzo et al. 2012).

A primeira avaliação com combinação de erros a efetuar foi a variação dos três diferentes tempos de reação em conjunto, e não em separado como nas análises de erros isolados. Tal é justificado pelo facto de os tempos de reação, em qualquer situação, estarem afetos às capacidades psico-motoras de cada condutor (Dewar & Olson, 2007), e, como tal, quando um condutor tem um TR com um valor baixo comparado com os valores médios, por exemplo, poderá não ser muito sensato assumir que terá um TRP e TRSL acima dos valores médios. Esta é a análise 5 e está pormenorizada no Quadro 4.2.

Quadro 4.2 – Gama de valores para variação dos parâmetros TR, TRP e TRSL na análise 5.

|             |      |      |      |      |      |             |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-------------|------|------|------|------|------|-------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| TR (seg.)   | 0.50 | 0.55 | 0.60 | 0.65 | 0.70 | <b>0.75</b> | 0.80 | 0.85 | 0.90 | 0.95 | 1.00 | 1.05 | 1.10 | 1.15 | 1.20 | 1.25 | 1.30 | 1.35 | 1.40 | 1.45 | 1.50 |
| TRP (seg.)  | 0.90 | 0.99 | 1.08 | 1.17 | 1.26 | <b>1.35</b> | 1.44 | 1.53 | 1.62 | 1.71 | 1.80 | 1.89 | 1.98 | 2.07 | 2.16 | 2.25 | 2.34 | 2.43 | 2.52 | 2.61 | 2.70 |
| TRSL (seg.) | 0.90 | 0.99 | 1.08 | 1.17 | 1.26 | <b>1.35</b> | 1.44 | 1.53 | 1.62 | 1.71 | 1.80 | 1.89 | 1.98 | 2.07 | 2.16 | 2.25 | 2.34 | 2.43 | 2.52 | 2.61 | 2.70 |

Considerou-se ainda importante analisar o efeito da combinação de erros das análises 1 e 3, com os parâmetros *tempo de reação* e a *distância mínima entre veículos*, assim como o efeito da combinação de erros das análises 1 e 4, com os parâmetros *tempo de reação* e a *aceleração máxima*. Resultaram assim, a análise 6 e análise 7, respetivamente. Aqui cingiu-se a gama de valores a testar para a zona de especial interesse (que são os valores mais realistas), visto já se ter, nas análises isoladas, estudado o comportamento do modelo perante erros nas zonas limite de valores dos parâmetros a estudar.

Situação que também se considerou proveitoso estudar foi a variação de um erro isolado mas testando o seu nível de impacto em função dos níveis de carregamento da rede. Para isso, achou-se adequado variar o fator de carregamento da matriz de veículos ligeiros final, tal como descrita em 4.2. Assim, fez-se essa variação com base no carregamento de referência, com os fatores 80%, 90%, 100%, 110%, 120%. Esta é a análise 8.

Ainda se considerou adequado avaliar o efeito da introdução de erros em três parâmetros diferentes. Então fez-se a variação dos parâmetros *tempo de reação*, *distância mínima entre veículos* e *aceleração máxima*. Para introdução dos erros foram usados os intervalos das análises 6 e 7 para os mesmos parâmetros, fazendo uma análise com a combinação de “todos

com todos”, tendo-se reduzido a gama de valores para limitar o tempo de computação, como apresentada no Quadro 4.3. Esta é a análise 9.

Quadro 4.3 – Gama de valores da análise 9 (variáveis independentes).

|                          |      |      |      |      |      |
|--------------------------|------|------|------|------|------|
| TR (seg.)                | 0.60 | 0.70 | 0.75 | 0.85 | 0.90 |
| DMV (m)                  | 0.80 | 1.00 | 1.20 | 1.30 | -    |
| AMáx (m/s <sup>2</sup> ) | 2.70 | 2.80 | 3.00 | 3.20 | -    |

### 4.3.3 Listagem síntese dos casos de estudo

Apresenta-se no Quadro 4.4 um resumo das análises efetuadas com os respetivos parâmetros que sofreram introdução de erros. De notar que se efetuaram 30 corridas para testar cada valor, sendo esse resultado a média calculada pelo *Aimsun*. No conjunto foram efetuadas mais de 12000 corridas no *Aimsun* para sustentar todos os resultados apresentados. O número de corridas para cada análise apresenta-se no Quadro 4.5.

Quadro 4.4 – Resumo dos parâmetros com erros introduzidos nas várias análises.

| Análise | Parâmetros com introdução e variação de erros |                          |                         |                                 |                                     |                                       |                      |  |
|---------|---|--------------------------|-------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|----------------------|--|
|         | PS - Passo de Simulação (s)                   | TR - Tempo de Reação (s) | TRP - TR em Paragem (s) | TRSL - TR em Sinal Luminoso (s) | Distância mínima entre veículos (m) | Aceleração máxima (m/s <sup>2</sup> ) | Carreg. da matriz b. |  |
| 1       | <b>[0.5 ; 1.5] 0.05</b>                       | <b>[0.5 ; 1.5] 0.05</b>  | {1.35}                  | {1.35}                          | x={1.0}                             | x={3.0}                               | {100%}               |  |
| 2       | {0.75}  | {0.75}                   | <b>[0.9 ; 2.7] 0.09</b> | <b>[0.9 ; 2.7] 0.09</b>         | x={1.0}                             | x={3.0}                               | {100%}               |  |
| 3       | {0.75}  | {0.75}                   | {1.35}                  | {1.35}                          | <b>X= [0.5 ; 2.0] 0.1</b>           | x={3.0}                               | {100%}               |  |
| 4       | {0.75}  | {0.75}                   | {1.35}                  | {1.35}                          | x={1.0}                             | <b>X= [2.0 ; 4.0] 0.1</b>             | {100%}               |  |
| 5       | <b>[0.5 ; 1.5] 0.05</b>                       | <b>[0.5 ; 1.5] 0.05</b>  | <b>[0.9 ; 2.7] 0.09</b> | <b>[0.9 ; 2.7] 0.09</b>         | x={1.0}                             | x={3.0}                               | {100%}               |  |
| 6       | <b>[0.6 ; 0.9] 0.05</b>                       | <b>[0.6 ; 0.9] 0.05</b>  | {1.35}                  | {1.35}                          | <b>X= [0.7 ; 1.3] 0.1</b>           | x={3.0}                               | {100%}               |  |
| 7       | <b>[0.6 ; 0.9] 0.05</b>                       | <b>[0.6 ; 0.9] 0.05</b>  | {1.35}                  | {1.35}                          | x={1.0}                             | <b>X= [2.7 ; 3.3] 0.1</b>             | {100%}               |  |
| 8.a)    | <b>[0.5 ; 1.5] 0.05</b>                       | <b>[0.5 ; 1.5] 0.05</b>  | {1.35}                  | {1.35}                          | x={1.0}                             | x={3.0}                               | <b>{80%}</b>         |  |
| 8.b)    | <b>[0.5 ; 1.5] 0.05</b>                       | <b>[0.5 ; 1.5] 0.05</b>  | {1.35}                  | {1.35}                          | x={1.0}                             | x={3.0}                               | <b>{90%}</b>         |  |
| 8.c)    | <b>[0.5 ; 1.5] 0.05</b>                       | <b>[0.5 ; 1.5] 0.05</b>  | {1.35}                  | {1.35}                          | x={1.0}                             | x={3.0}                               | <b>{100%}</b>        |  |
| 8.d)    | <b>[0.5 ; 1.5] 0.05</b>                       | <b>[0.5 ; 1.5] 0.05</b>  | {1.35}                  | {1.35}                          | x={1.0}                             | x={3.0}                               | <b>{110%}</b>        |  |
| 8.e)    | <b>[0.5 ; 1.5] 0.05</b>                       | <b>[0.5 ; 1.5] 0.05</b>  | {1.35}                  | {1.35}                          | x={1.0}                             | x={3.0}                               | <b>{120%}</b>        |  |
| 9       | <b>{0.60; 0.70; 0.75; 0.85; 0.90}</b>         |                          | {1.35}                  | {1.35}                          | <b>x= {0.8; 1.0; 1.2; 1.3}</b>      | <b>x= {2.7; 2.8; 3.0; 3.2}</b>        | {100%}               |  |

**Legenda:**

**[0.5 ; 1.5] 0.05** – Parâmetro que se variou no intervalo de 0.5 a 1.5, com incrementos de 0.05 entre cada valor;

{1.35} – Parâmetro que se manteve sempre fixo ao longo da análise, com valor de 1.35;

**X= [0.5 ; 2.0] 0.1** – Parâmetro que se variou o seu valor médio (X) no intervalo de 0.5 a 2.0, com incrementos de 0.1 entre cada valor;

x={1.0} – Parâmetro no qual se manteve sempre fixo o seu valor médio (x) ao longo da análise, com valor de 1.0;

**{0.60; 0.70; ...; 0.90}** – Parâmetro que se variou com os valores 0.60; 0.70; ...; 0.90;



Quadro 4.5 – Número de corridas efetuadas nas diferentes análises.

| Análise        | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6    | 7    | 8      | 9    |
|----------------|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|--------|------|
| Nº de corridas | 600 | 600 | 450 | 450 | 600 | 1470 | 1470 | 10*600 | 2400 |

## 4.4 Indicadores de desempenho

### 4.4.1 Seleção inicial dos indicadores de desempenho

Para a análise das redes em estudo, os *outputs* do *Aimsun* disponibilizam uma vasta gama de indicadores de desempenho com diferentes níveis de agregação. Estes indicadores poderão ser relativos a toda uma rede (globais), para cada *troço*, movimento de viragem (em interseções), sub-rotas definidas pelo modelador, ou ainda para cada par Origem/Destino.

Entre os indicadores globais (ou do sistema, *sis*), alguns dos mais importantes são o tempo médio de viagem, o tempo de atraso médio e o tempo médio de paragem. O tempo médio de viagem (TMV) é o tempo médio que um veículo demora a percorrer um quilómetro dentro da rede. É a média de todos os tempos de viagem individuais (desde a entrada na rede até à saída) de cada veículo que circulou na rede ( $TMV_i$ ), convertido em tempo por quilómetro. A unidade usada é «segundo por quilómetro».

$$TMV_{sis} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{sis}} TMV_i}{N_{sis}}$$

O atraso médio (AM), ou tempo de atraso médio, é o tempo médio de demora por veículo por quilómetro. É a diferença entre o tempo de viagem em regime livre e o tempo de viagem real. É calculado como uma média de todos os veículos e então convertido em tempo por quilómetro. A unidade usada é «segundo por quilómetro».

$$AM_{sis} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{sis}} AM_i}{N_{sis}}$$

O tempo médio de paragem (TMP) é o tempo de paragem médio por veículo por quilómetro. A unidade usada é «segundo por quilómetro».

$$TMP_{sis} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{sis}} TMP_i}{N_{sis}}$$

Um indicador também importante, que não é um valor médio, é o tempo total de viagem (TTV). Este é a soma dos tempos de viagem de todos os veículos que circularam na rede. ( $TEN_i$  – horário de entrada do veículo *i* na rede (no sistema),  $TEX_i$  – horário de saída do veículo *i* na rede (no sistema))

$$TTV_{sis} = \sum_{i=1}^{N_{sis}} TEX_i - TEN_i$$

Ainda importantes são os indicadores relativos ao comprimento de filas. Estes são o comprimento médio de fila e o comprimento máximo de fila. O primeiro é um indicador que se pode retirar tanto relativamente a toda a rede, como para cada *troço*. É o comprimento médio de fila num determinado *troço*, expresso como o número de veículos por via. É calculado por média de tempo. No caso de ser para toda a rede, é feita uma média entre os valores médios de todas as seções. Já o comprimento máximo de fila é um indicador apenas local, referente a um *troço*, que indica o comprimento máximo de fila alcançado num determinado *troço*, também expresso como o número de veículos por via. O modo como estes indicadores são calculados pode ser consultado com mais detalhe em TSS (2012a, pp. 242-269).

#### 4.4.2 Análise preliminar dos indicadores de desempenho

Considerou-se importante fazer uma análise preliminar sobre quais os indicadores de desempenho, com evoluções/variações no erro significativamente diferentes de outros indicadores no conjunto dos selecionados. Para tal usaram-se os resultados da análise 1, que podem ser observados nas figuras Figura 4.4, Figura 4.5 e Figura 4.6, juntamente com o Quadro 4.6, onde se encontram os dados das regressões dos resultados apresentados nos gráficos. Verificou-se que todos os indicadores globais (para toda a rede) evoluem de um modo muito semelhante, sendo que os indicadores de tempos médios evoluem de modo praticamente indistinto.

Quadro 4.6 – Comparação das tendências observadas na análise 1.

| Indicadores de desempenho       | Regressão linear |                | Regressão polinomial (2º grau)          |                |
|---------------------------------|------------------|----------------|---|----------------|
|                                 | Y                | R <sup>2</sup> | y                                       | R <sup>2</sup> |
| Tempo médio de viagem           | 139.47x + 125.52 | 0.835          | 101.04x <sup>2</sup> - 62.604x + 217.29 | 0.867          |
| Atraso médio                    | 139.46x + 58.244 | 0.835          | 101.06x <sup>2</sup> - 62.67x + 150.02  | 0.867          |
| Tempo médio de paragem          | 130.19x + 46.16  | 0.831          | 104.84x <sup>2</sup> - 79.488x + 141.39 | 0.870          |
| Tempo total de viagem           | 38.785x + 45.838 | 0.746          | 17.19x <sup>2</sup> - 4.405x + 61.452   | 0.756          |
| Comprimento médio de fila       | 31.69x + 9.488   | 0.914          | 25.76x <sup>2</sup> - 19.842x + 32.893  | 0.958          |
| Comp. médio de fila (entrada B) | 10.135x + 1.472  | 0.918          | 7.859x <sup>2</sup> - 5.583x + 8.611    | 0.959          |

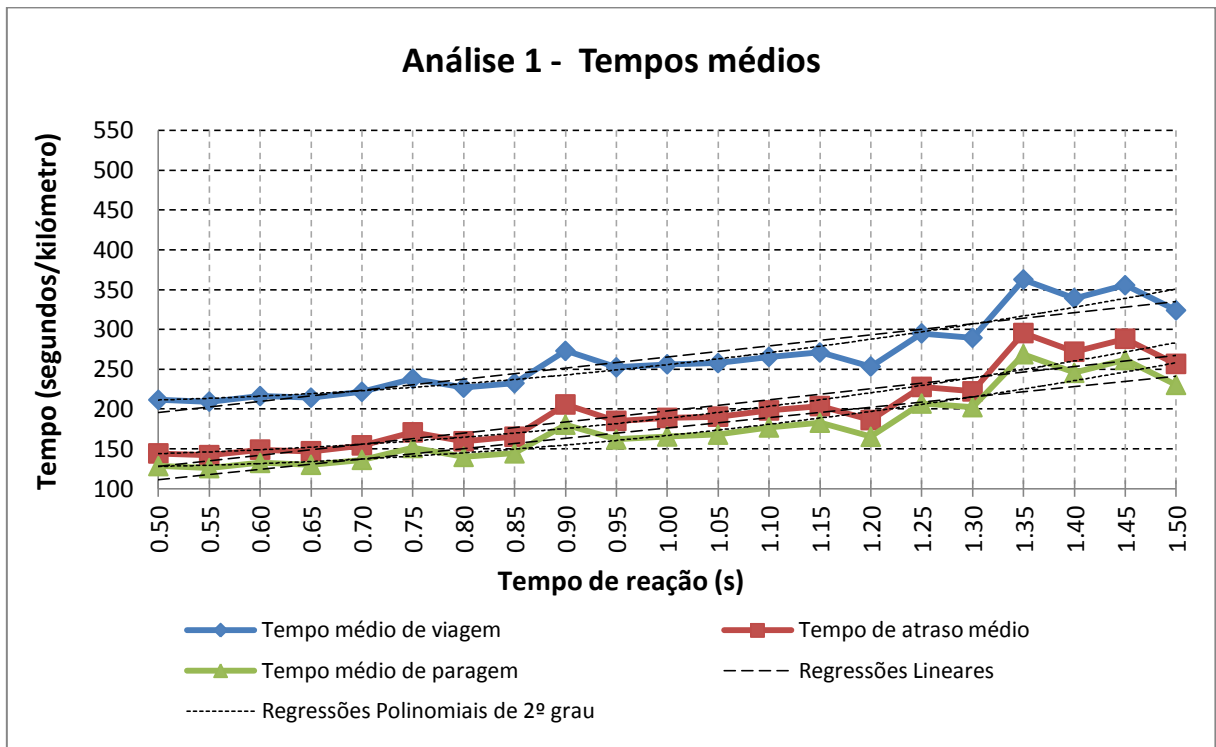


Figura 4.4 – Gráfico com os resultados para os tempos médios da análise 1.

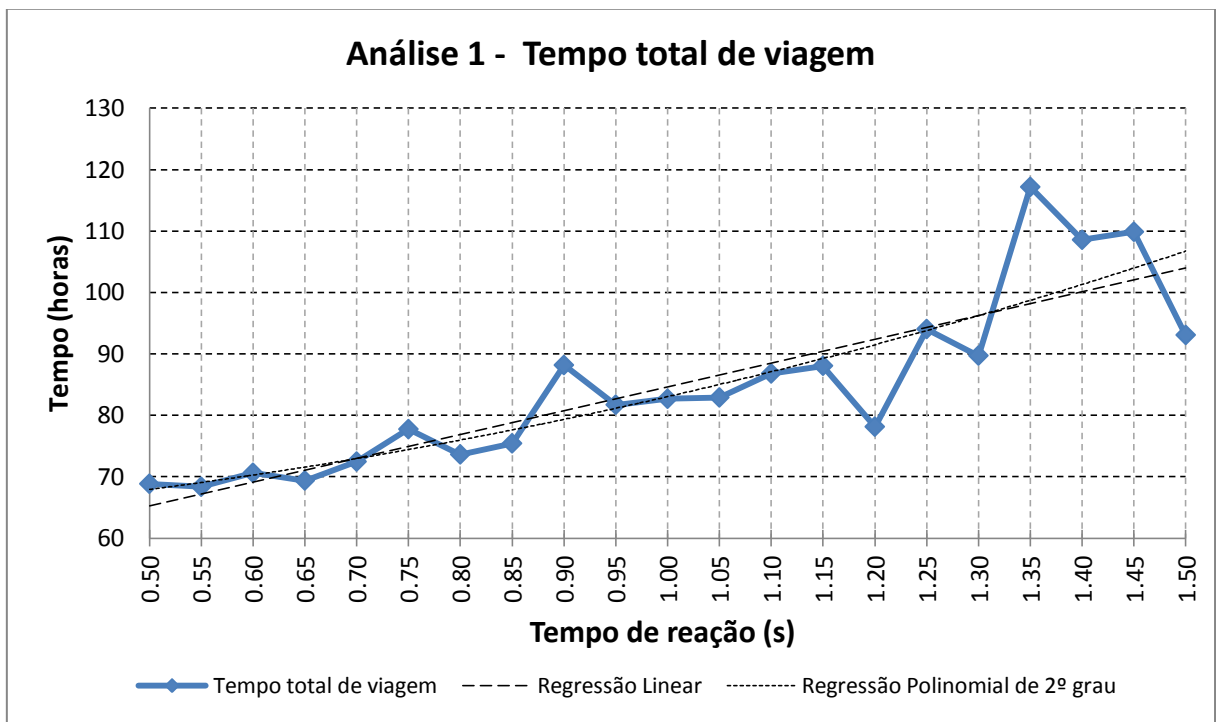


Figura 4.5 – Gráfico com os resultados para os tempos totais de viagem da análise 1.

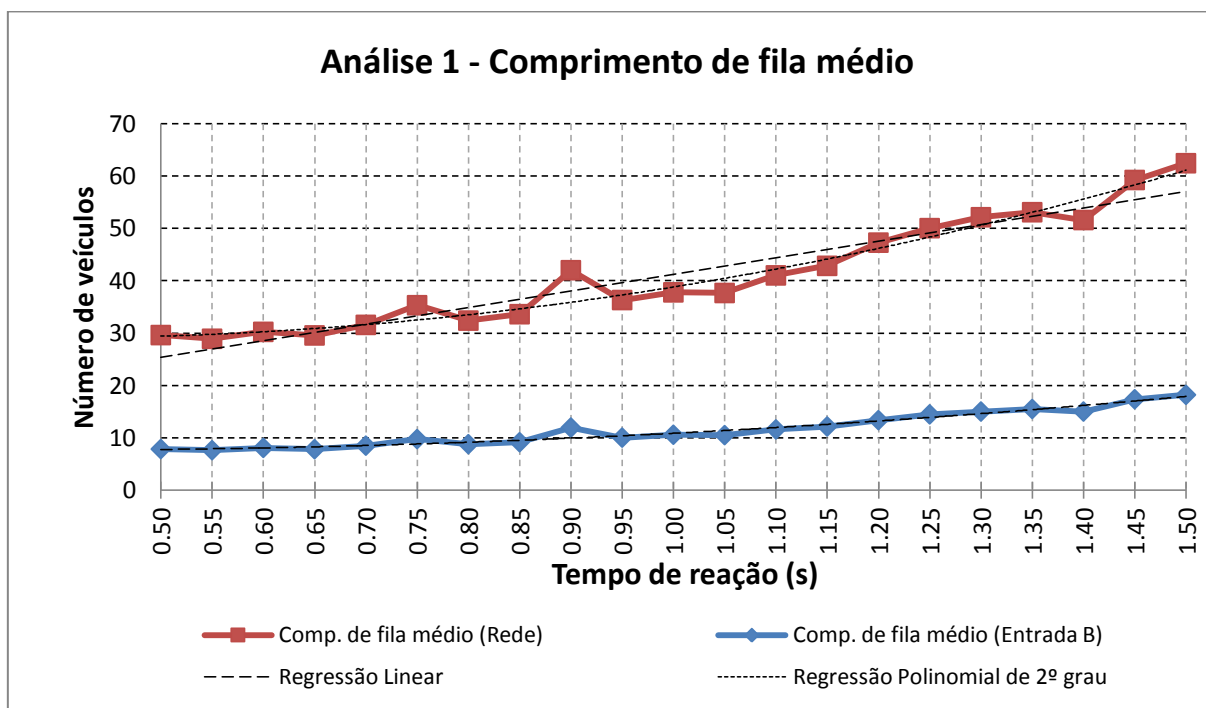


Figura 4.6 – Gráfico com os resultados para os comprimentos de filas da análise 1.

Com estes resultados achou-se adequado não avaliar os indicadores tempo de atraso médio e tempo médio de paragem, já que a sua evolução parece poder ser razoavelmente descrita apenas pela avaliação do indicador *tempo médio de viagem* (TMV).

Observando os indicadores de comprimentos de filas, verifica-se que estes têm um comportamento um pouco diferente do indicador TMV. Contudo, e com base em alguns testes, considerou-se que os comprimentos de fila não seriam indicadores tão importantes uma vez que não estavam em causa situações onde fenómenos de *blocking-back* fossem uma questão relevante, e portanto o mais importante será o tempo que um veículo demora a percorrer o seu trajeto até chegar ao seu destino e não tanto os comprimentos de filas. Assim, adotou-se o indicador *tempo médio de viagem* (TMV) como o único a estudar.

Analisando ainda o Quadro 4.6, pode-se observar que os dois tipos de regressões apresentados (linear e polinomial de 2º grau) têm ajustamentos similares, com correlações ( $R^2$ ) muito próximas. Apesar de não apresentado, também se testou o ajustamento com regressões polinomiais de 3º grau. Quanto às tendências a adotar, considerou-se inadequada a regressão polinomial de 3º grau, já que se verificou que esta se aproximava mais a comportamentos pontuais, afastando-se da descrição da tendência geral, que é o que se pretende estudar. Por outro lado, a regressão linear poderia simplificar demasiado a comparação de análises, retirando flexibilidade nas análises da evolução do efeito da introdução de erros. Assim

optou-se por eleger a regressão polinomial de 2º grau como a mais adequada para comparação de tendências, e por conseguinte o tipo de regressão a, em princípio, utilizar em todas as análises e comparações.

## 4.5 Análise dos resultados

### 4.5.1 Análise 1 – Tempo de reação

Na análise 1 fez-se a variação do tempo de reação (TR) no intervalo [0.50 ; 1.50]s, com os respetivos resultados já apresentados em 4.4.2. Pode-se, primeiramente, fazer uma análise de resíduos de forma qualitativa. Na Figura 4.4 acima, com base no indicador tempo médio de viagem (TMV), e para o ajustamento com regressão polinomial de 2º grau, não se consegue definir uma tendência dos resíduos de forma clara, concluindo-se que apesar dos resultados serem aparentemente dispersos, as linhas de tendência conseguem representar a evolução dos resultados de forma confiável. Assim pode-se observar que, tal como seria expectável, a tendência é os valores do TMV irem aumentando progressivamente com o aumento do TR, com um aumento mais acentuado a partir de um TR na ordem dos 0.90 segundos.

Fez-se a análise da relação entre o erro no resultado em função do erro introduzido na variável *tempo de reação*, a partir de vários valores de partida, usando a respetiva função de ajustamento escolhida, sendo estes valores de partida (0.60, 0.75, 0.90 e 1.10 segundos) os considerados sem erro (em cada situação, respetivamente). Ao observar a Figura 4.7 tem-se uma perceção melhor do impacto no resultado de um erro introduzido. Para o TR de partida de 0.75 segundos, verifica-se que a introdução de um erro de +20% introduz um erro no resultado em cerca de +7%, enquanto que para uma introdução de erro negativo se observa um menor impacto no resultado, deixando a ideia que é preferível errar por defeito que por excesso, ainda que ligeiramente. Verifica-se também que o erro no resultado em função do erro introduzido vai aumentando à medida que se toma como valor de partida um maior valor.

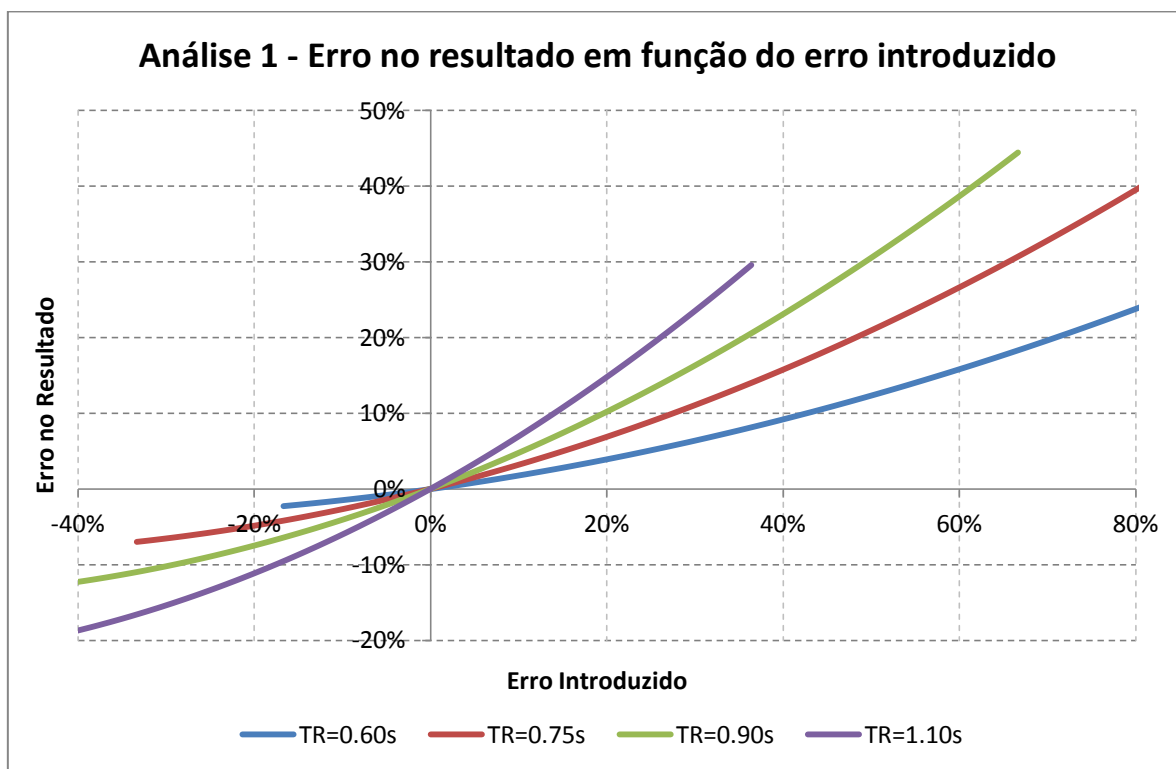


Figura 4.7 – Gráfico de comparação do erro no resultado em função do erro introduzido, resultantes da análise 1, consoante diferentes valores de partida.

#### 4.5.2 Análise 2 – Tempo de reação em paragem e em sinal luminoso

Na análise 2 foi feita uma introdução de erros no *tempo de reação em paragem* (TRP) e *tempo de reação em sinal luminoso* (TRSL), como apresentado em 4.3.1, no intervalo de valores para o TRP de [0.90;2.70] segundos. Na Figura 4.8 podem-se observar os resultados que indicam que a tendência de evolução de erro é aproximadamente linear. Os valores dos ajustamentos aos resultados são para a regressão polinomial de 2º grau de  $R^2=0.9682$ , e para a regressão linear de  $R^2=0.9671$ .

Na Figura 4.9 está representada a evolução do erro no resultado em função do erro introduzido consoante diferentes valores de partida. Aqui verifica-se que para os diferentes valores de partida o impacto nos resultados é bastante próximo, e que são perto da ordem de um para um, i.e., para +20% de introdução de erro, tem-se aproximadamente um erro de +20% no resultado, dispersando-se um pouco para introdução de erros superiores. De notar também que estes resultados e tendências se verificam simetricamente relativamente à introdução de erros negativos.

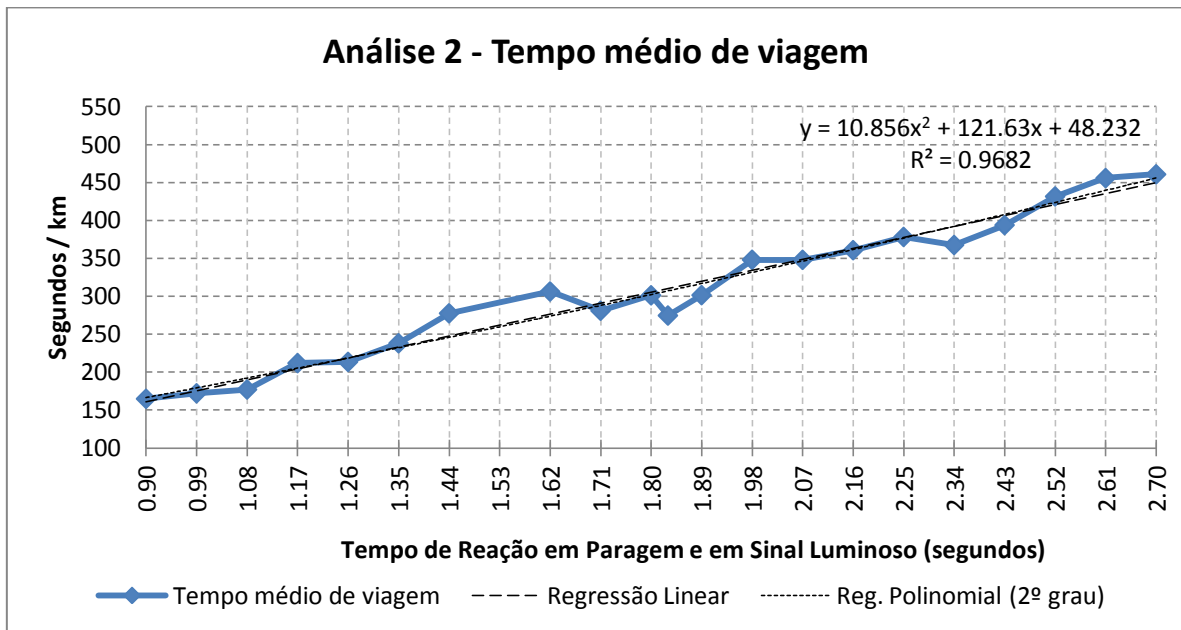


Figura 4.8 – Gráfico com os resultados para o tempo médio de viagem da análise 2.

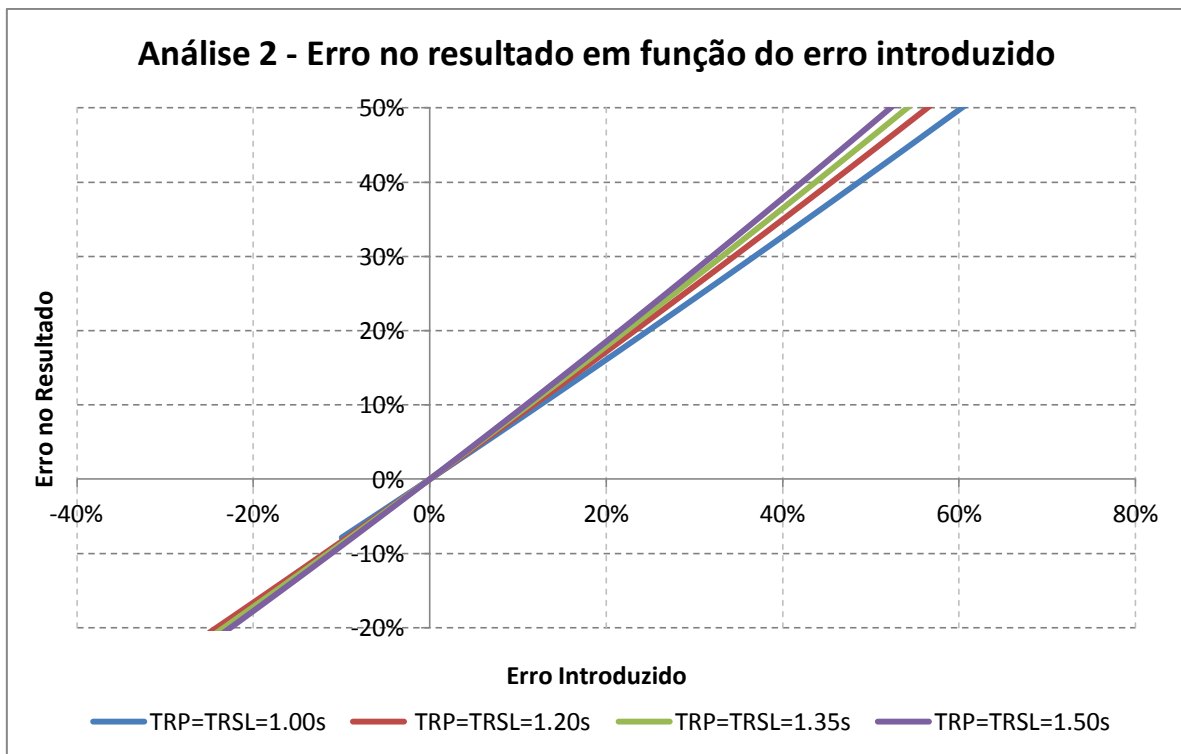


Figura 4.9 – Gráfico de comparação do erro no resultado em função do erro introduzido, resultantes da análise 2, consoante diferentes valores de partida.

### 4.5.3 Análise 3 – Distância mínima entre veículos

Para a análise 3 foram introduzidos erros no parâmetro *distância média entre veículos* (DMV), a variar para o veículo “car” no intervalo [0.5;2.0] metros (valor médio), com incrementos de 0.1 metros, tal como descrito em 4.3.1. Os resultados podem ser observados na Figura 4.10, na qual se constata uma subida razoável do tempo médio de viagem, com a subida do valor da DMV. O ajustamento da regressão polinomial de 2º grau aos resultados teve um valor de  $R^2=0.9034$ . Contudo, como pode ser observado na Figura 4.11, o efeito que o erro de entrada tem no erro dos resultados, é da proporção de mais de dois para um, sendo que um erro de entrada de +20% resulta num erro na ordem dos +8%, havendo uma ligeira diferença para introdução de erro negativo, já que um erro de -20% resulta num erro de -10%, ficando a ideia de que será preferível errar por excesso e não por defeito, embora na gama de erros habitualmente expectáveis, ou erros padrão (entre -20% e +20%), esta diferença é praticamente inexistente.

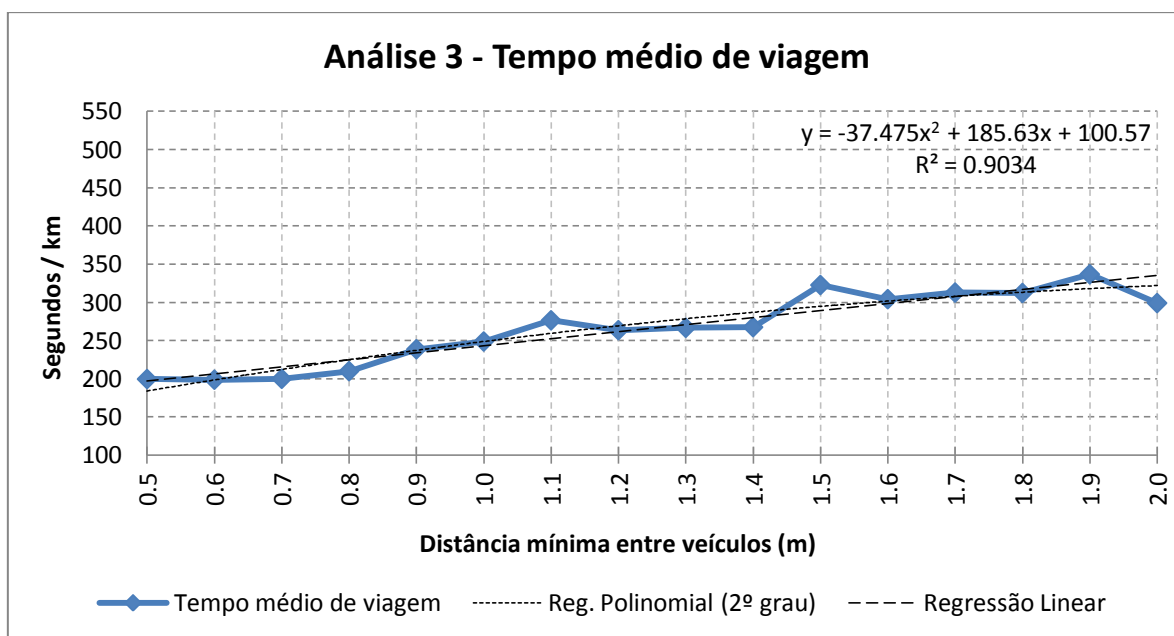


Figura 4.10 – Gráfico com os resultados para o tempo médio de viagem da análise 3.



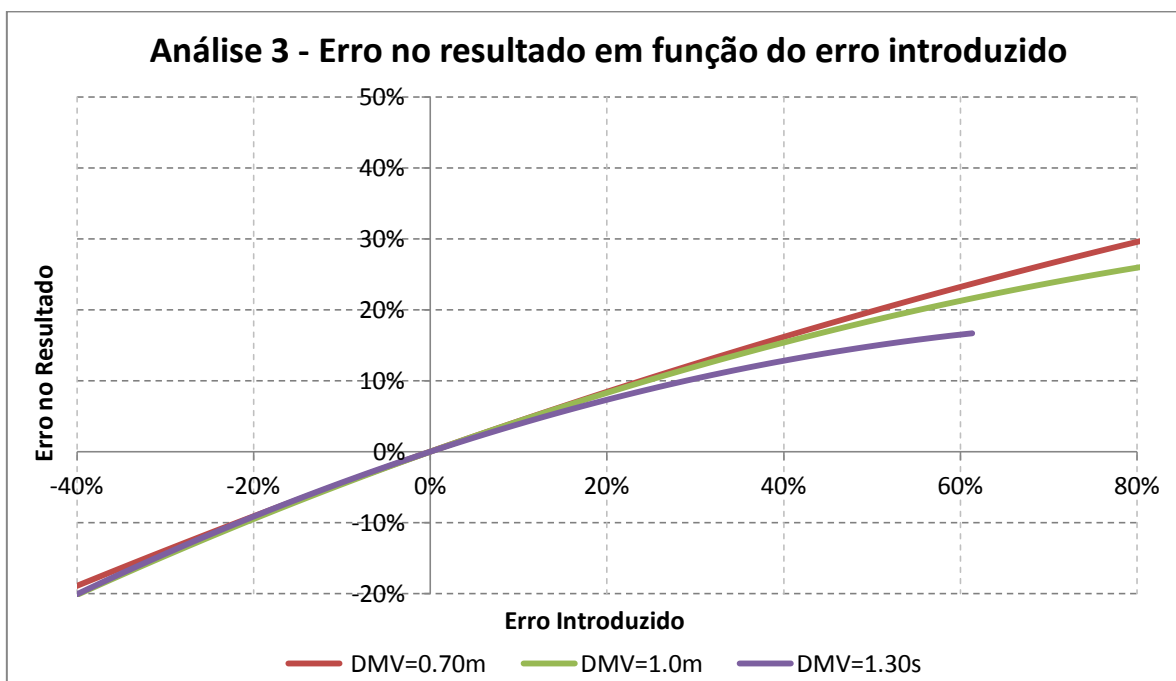


Figura 4.11 – Gráfico de comparação do erro no resultado em função do erro introduzido, resultantes da análise 3, consoante diferentes valores de partida.

#### 4.5.4 Análise 4 – Aceleração máxima

Para a análise 4 foram introduzidos erros no parâmetro *aceleração máxima*, a variar para o veículo “car” no intervalo [2.0;4.0] m/s<sup>2</sup> (valor médio), com incrementos de 0.1 m/s<sup>2</sup>, tal como descrito em 4.3.1. Nos resultados, que podem ser observados na Figura 4.12, denota-se uma ligeira diminuição no tempo médio de viagem à medida que os valores de aceleração máxima vão aumentando. O ajustamento da regressão polinomial aos resultados teve um valor de R<sup>2</sup>=0.6058. Essa diminuição é perceptível também na Figura 4.13, onde, para introdução de erro “positivo” de +20% se verifica um erro no resultado na ordem dos -5%, enquanto que para introdução de erro negativo de -20% verifica-se um erro no resultado na ordem dos 10%, sendo este efeito não simétrico claramente visível mesmo para valores relativamente conservadores dos erros.

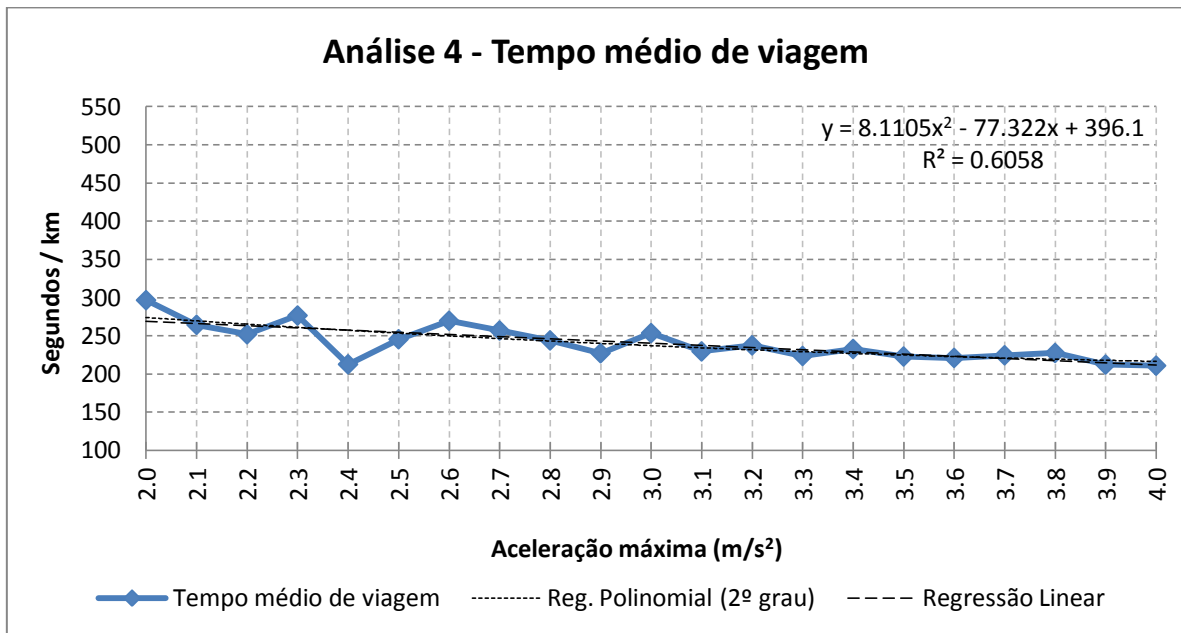


Figura 4.12 – Gráfico com os resultados para o tempo médio de viagem da análise 4.

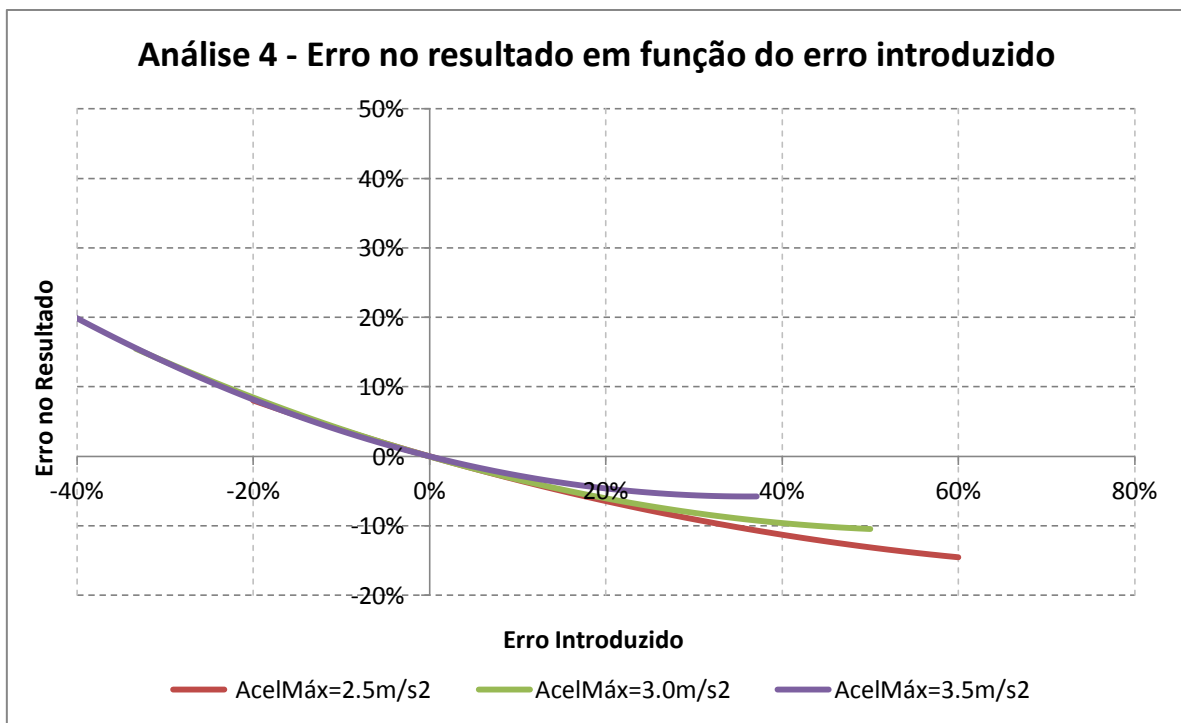


Figura 4.13 – Gráfico de comparação do erro no resultado em função do erro introduzido, resultantes da análise 4, consoante diferentes valores de partida.

#### 4.5.5 Análise 5 – Tempo de reação, tempo de reação em paragem e em sinal luminoso

A primeira das análises com combinação, ou agregação, de erros é a análise com a agregação de erros no *tempo de reação* (TR), *tempo de reação em paragem* (TRP) e *tempo de reação em sinal luminoso* (TRSL). Esta foi efetuada como descrito em 4.3.2, com o TR a variar no intervalo [0.5; 1.5]s, com o TRP e TRSL sendo 180% o valor do TR. Os resultados podem ser observados na Figura 4.14. Observa-se que a evolução dos resultados acontece de forma mais vincada em relação ao que se observou nas análises 1 e 2, o que seria de esperar, já que se está a introduzir erro nos três (na prática dois) parâmetros agregadamente, *versus* os mesmos parâmetros isolados. O ajustamento da regressão polinomial de 2º grau aos resultados teve um valor de  $R^2=0.9455$ .

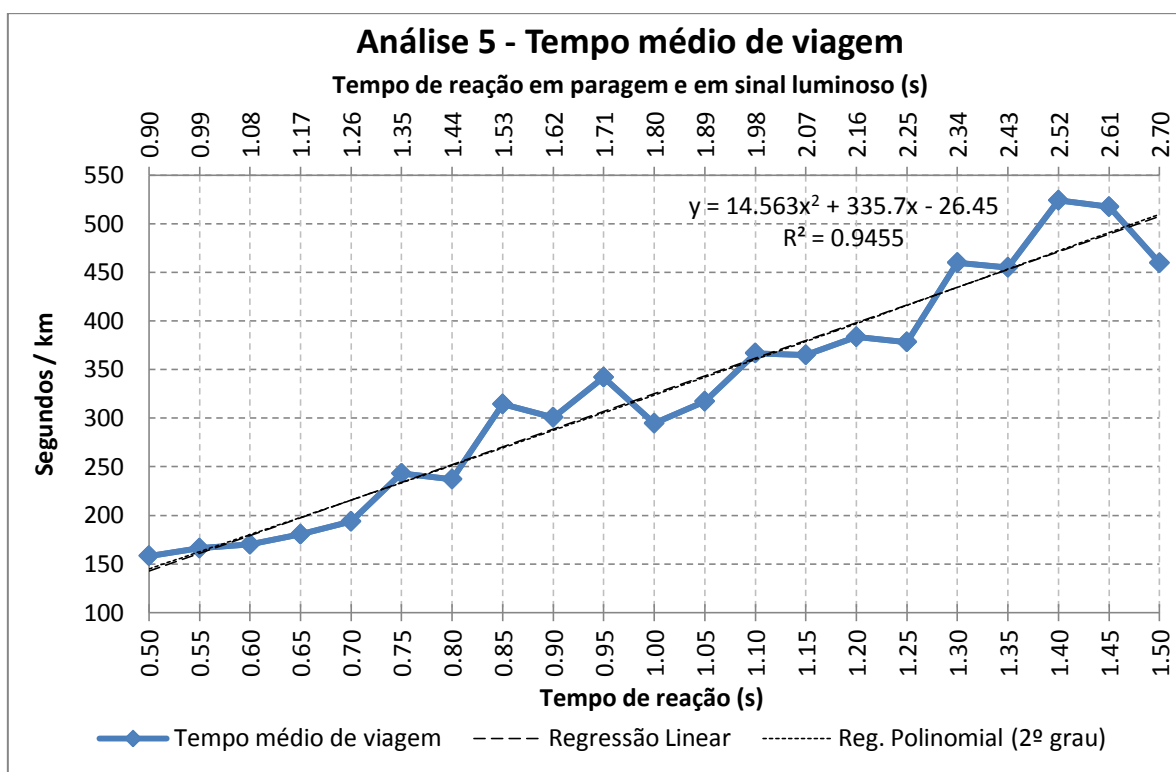


Figura 4.14 – Gráfico com os resultados para o tempo médio de viagem da análise 5.

À semelhança das análises anteriores, efetuou-se uma comparação (ver Figura 4.15) do erro no resultado em função do erro introduzido, ao qual se julgou interessante juntar o mesmo tipo de resultado gráfico, mas referente às análises 1, 2 e, especificamente o resultado da soma dos impactos dos erros obtidos isoladamente para cada uma destas análises, em função dos erros introduzidos (no gráfico: “soma dos erros das análises 1 e 2”).

Primeiramente, pode-se observar que na análise 5 a introdução de erro têm maiores repercussões no resultado do que as análises 1 e 2 consideradas isoladamente, em consonância com o já observado. Contudo, verifica-se que a soma do erro nos resultados devido à introdução de erro em separado no TR e no TRP(=TRSL) é praticamente igual ao erro nos resultados da introdução conjunta de erro nos mesmo parâmetros (análise 5), até à introdução de erro de +20%, a partir do qual os resultados começam a divergir, verificando-se o mesmo para a introdução de erros aproximadamente até -20%. Deste modo pode-se concluir com alguma confiança que os erros nos resultados devido aos erros introduzidos nestes parâmetros têm um efeito aditivo no intervalo +/-20%.

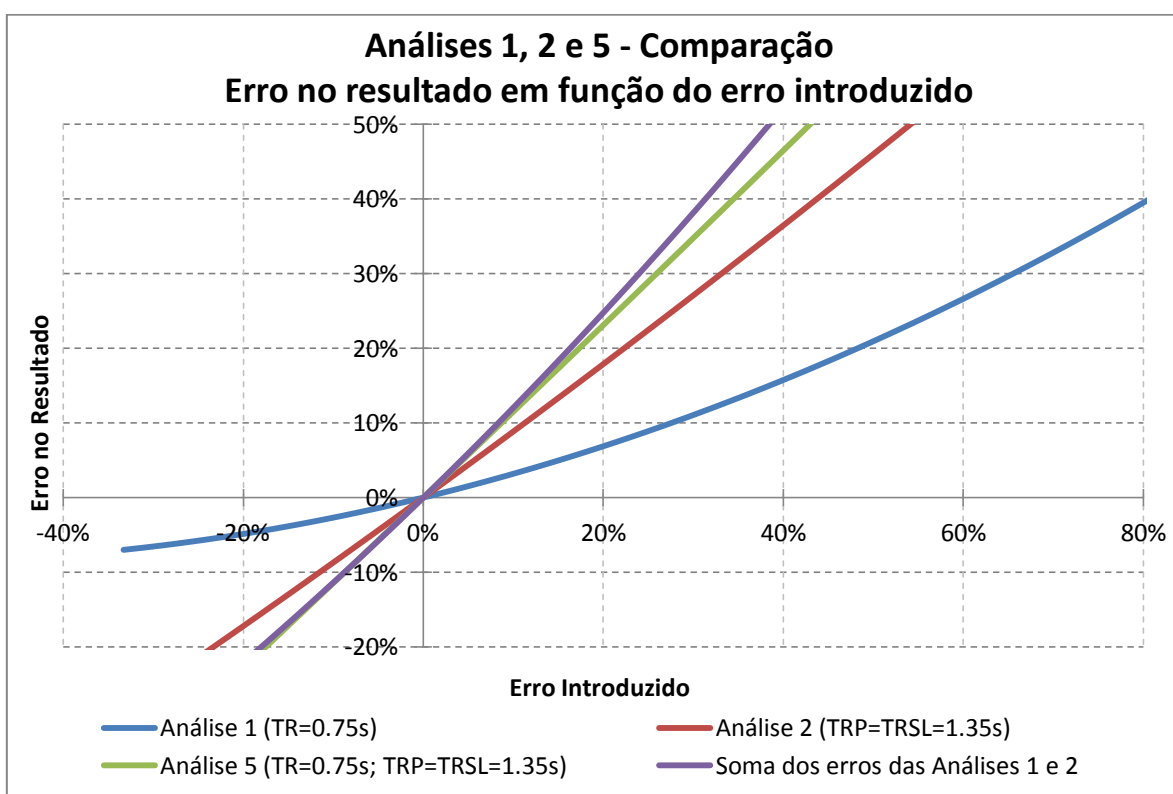


Figura 4.15 – Gráfico de comparação do erro no resultado em função do erro introduzido, resultantes das análises 1,2 e 5, com a representação dos resultados somados das análises 1 e 2.

#### 4.5.6 Análise 6 – Tempo de reação e distância mínima entre veículos

Na análise 6 fez-se um estudo com agregação de erro do *tempo de reação* (TR) e da *distância mínima entre veículos* (DMV), tendo-se variado o TR no intervalo [0.60; 0.90]s, e a DMV no intervalo [0.7; 1.3]m, com os resultados representados na Figura 4.16. Analisando os resultados nota-se uma tendência para um aumento do TMV à medida que aumenta a DMV, para todos os valores do TR. Contudo, observando com atenção, existem bastantes irregularidades aparentemente “estranhas” no que toca ao TR. Verifica-se que, para todos os

valores da DMV, o TMV diminuí desde o TR=0.60s até ao TR=0.70s, quando seria esperado que aumentasse. Adicionalmente o TMV para o TR=0.80s é sempre menor que o TR=0.75s. Tais comportamentos não seriam de esperar, mas talvez sejam justificados com algum erro nos processos internos do *software*. Tal poderá também, especificamente, ser justificado pelos processos usados de geração de *sementes aleatórias*, apesar de tal não ter ficado claro depois de observados os seus valores.

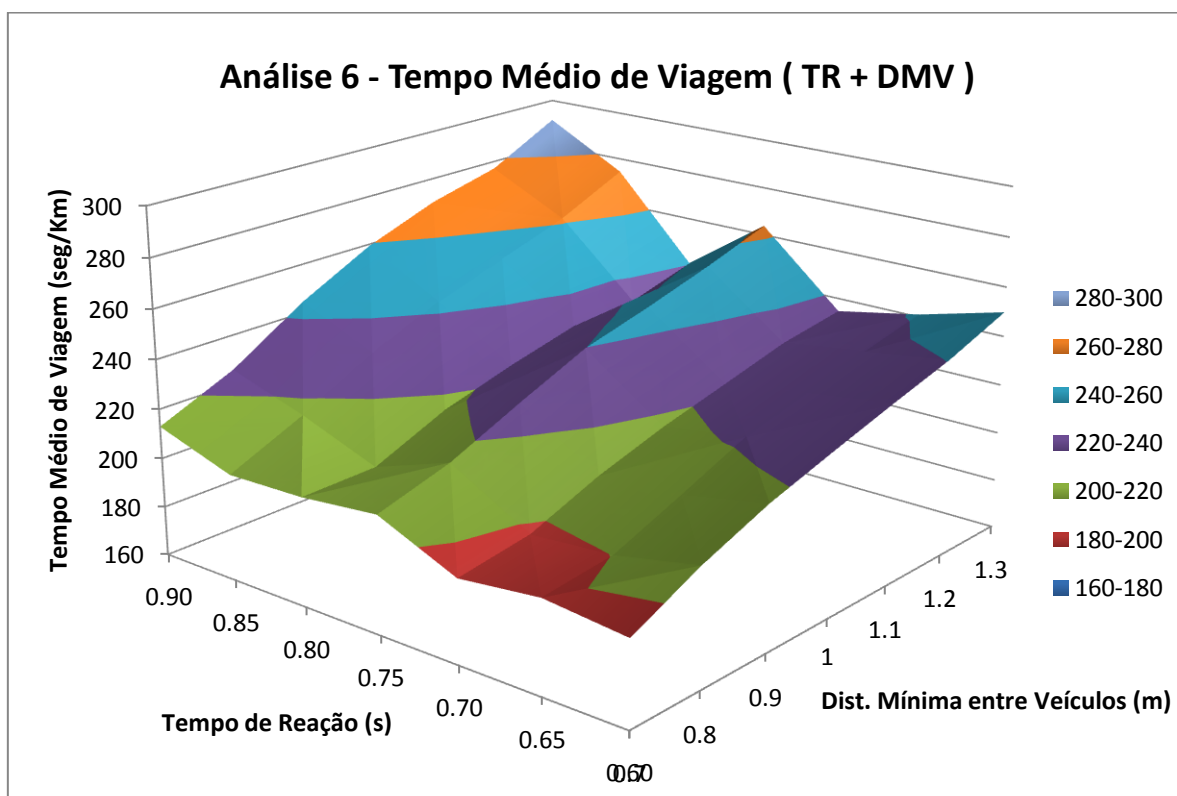


Figura 4.16 – Gráfico (superfície) com os resultados para o tempo médio de viagem da análise 6.

Com base nestes resultados efetuou-se uma regressão múltipla linear, com modelo:

$$TMV = \beta_0 + \beta_1 * TR + \beta_2 * DMV + erro$$

Aplicando a regressão na forma:

$$TMV = b_0 + b_1 * TR + b_2 * DMV$$

Os resultados desta regressão apresentam-se no Quadro 4.7, onde se verifica um bom ajustamento da regressão ( $R^2=0.812$ ) e a análise dos valores associados a  $b^*$  (coeficiente  $b$  normalizado) permite confirmar que, tal como verificado nas análises isoladas, o peso associado à variável DMV é superior à do TR. Em resultado de uma análise de resíduos, presente na Figura 4.17, observa-se a não existência notória de nenhuma tendência, o que

significa que a relação não é enviesada. Apesar disso nota-se uma ligeira “ondulação” dos resíduos, que pode eventualmente ser provocada pelas irregularidades acima referidas. Então, para prevenir eventuais efeitos “escondidos”, como relações não lineares, repetiu-se esta regressão múltipla fazendo várias transformações de variáveis, tanto para a dependente, como para as independentes, com várias combinações possíveis, mantendo-se os resultados inicialmente observados.

Quadro 4.7 – Resultados da regressão múltipla, para a variável dependente TMV, na análise 6.

| Statistic | Multiple R | Multiple R <sup>2</sup> | Adjusted R <sup>2</sup> | F(2,46) | p          | Std.Err. of Estimate |
|-----------|------------|-------------------------|-------------------------|---------|------------|----------------------|
| Value     | 0.90092    | 0.81165                 | 0.80346                 | 99.1131 | 2.1096E-17 | 10.05517             |

| N = 49    | b*       | Std.Err. of b* | b        | Std.Err. of b | t(46)   | p-value  |
|-----------|----------|----------------|----------|---------------|---------|----------|
| Intercept |          |                | 66.2739  | 13.02745      | 5.0872  | 0.000007 |
| DMV       | 0.782680 | 0.063989       | 87.8501  | 7.18227       | 12.2315 | 0.000000 |
| TR        | 0.446163 | 0.063989       | 100.1570 | 14.36454      | 6.9725  | 0.000000 |

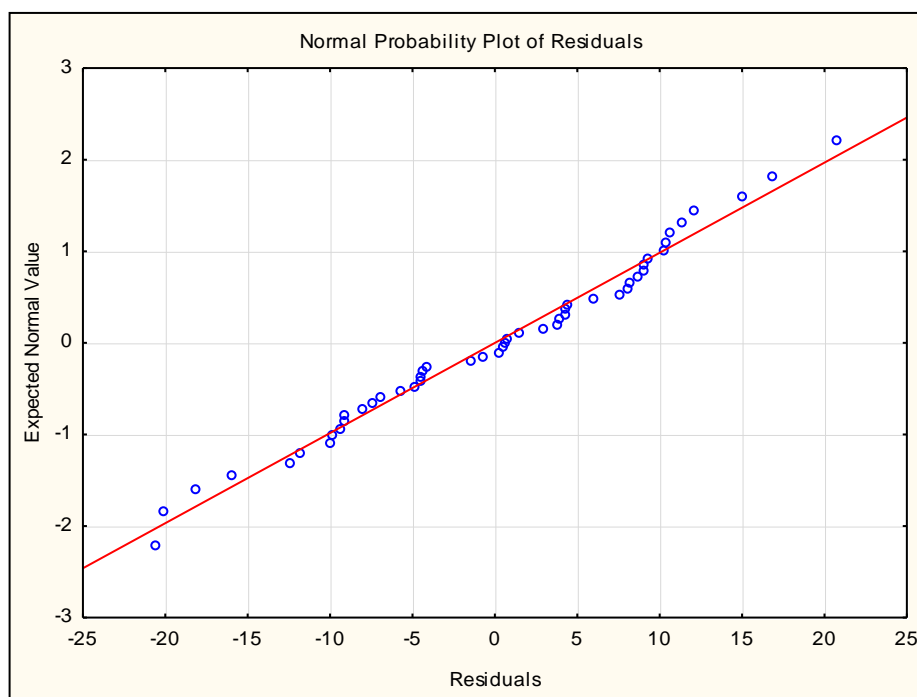


Figura 4.17 – Análise estatística de resíduos referente à análise 6.

#### 4.5.7 Análise 7 – Tempo de reação e aceleração máxima

Na análise 7 fez-se um estudo com agregação de erro do *tempo de reação* (TR) e da *aceleração máxima* (AMáx), tendo-se variando o TR no intervalo [0.60; 0.90]s, e a aceleração máxima no intervalo [2.7; 3.3]m/s<sup>2</sup>, com os resultados representados na Figura 4.18. Pode-se

observar aqui que, em consonância com os resultados da análise 4, a introdução de erro na aceleração máxima resulta num pequeno erro de resultado. Tal como na análise 6, volta a verificar-se um estranho comportamento, bastante similar ao lá observado: diminuição do TMV do TR=0.60s para TR=0.70s e uma depressão do TMV para o TR=0.80s. Deste modo nota-se alguma consistência no comportamento aparentemente anormal do modelo.

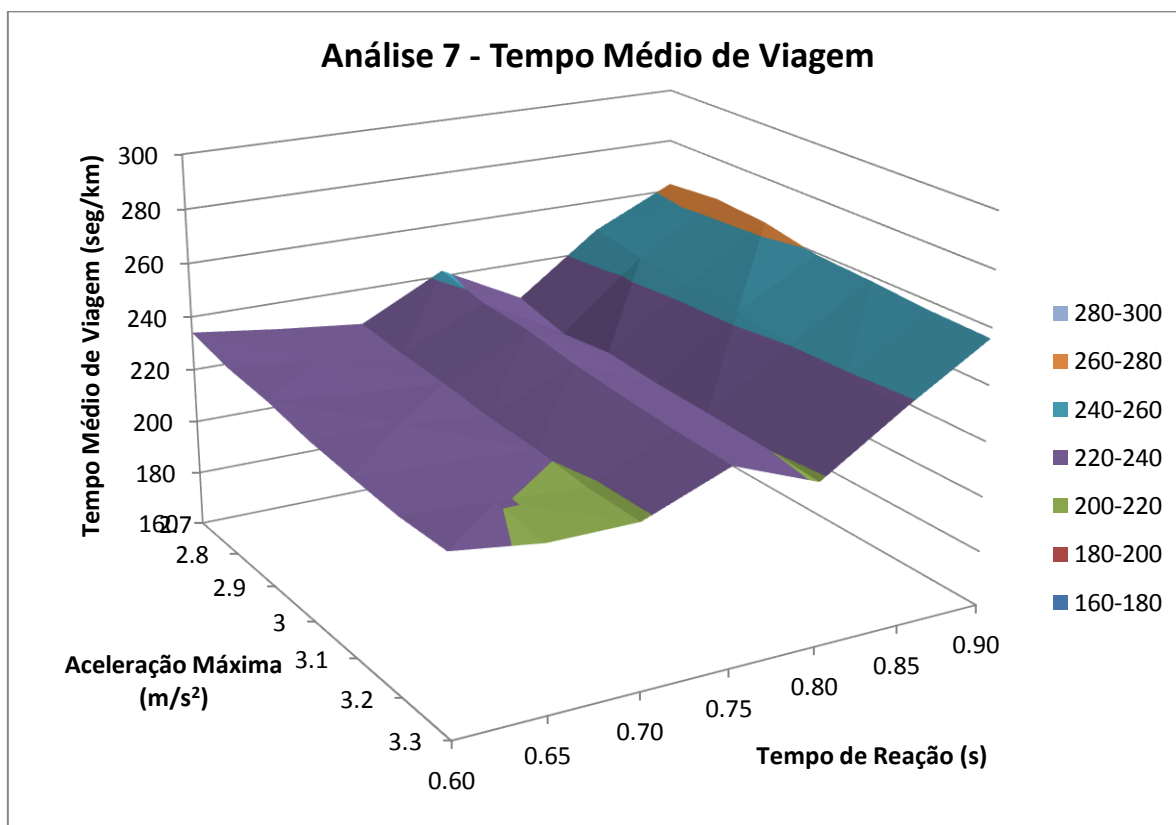


Figura 4.18 – Gráfico (superfície) com os resultados para o tempo médio de viagem da análise 7.

Também aqui se efetuou uma regressão múltipla linear, com o respetivo modelo e aplicação em tudo semelhante ao apresentado para a análise 6, com a diferença de se ter a variável AM<sub>Áx</sub> no lugar da DMV. Os resultados da regressão encontram-se no Quadro 4.8, onde se verifica um ajustamento satisfatório da regressão ( $R^2=0.581$ ). De realçar que o efeito positivo no erro do resultado devido ao TR é mitigado pelo efeito negativo devido à AM<sub>Áx</sub>. Ainda assim confirma-se a pouca influência da AM<sub>Áx</sub> ( $|b^*|=0.225$ ) em comparação com o TR ( $b^*=0.728$ ). Também se efetuou uma análise de resíduos, cujos resultados podem ser observados na Figura 4.19, verificando-se que a relação não é enviesada. Porém, verifica-se que a “ondulação”, que se constatou também nos resíduos na análise 6, é de maior intensidade o que é compatível com a sua causa serem as irregularidades, que aqui também são mais marcadas.

Quadro 4.8 – Resultados da regressão múltipla, para a variável dependente TMV, na análise 7.

| Statistic | Multiple R | Multiple R <sup>2</sup> | Adjusted R <sup>2</sup> | F(2,46) | p         | Std.Err. of Estimate |
|-----------|------------|-------------------------|-------------------------|---------|-----------|----------------------|
| Value     | 0.76244    | 0.58132                 | 0.56311                 | 31.9342 | 2.0107E-9 | 8.9994               |

| N = 49    | b*        | Std.Err. of b* | b        | Std.Err. of b | t(76)    | p-value  |
|-----------|-----------|----------------|----------|---------------|----------|----------|
| Intercept |           |                | 205.2751 | 21.59899      | 9.50392  | 0.000000 |
| AMáx      | -0.225084 | 0.095403       | -15.1659 | 6.42816       | -2.35929 | 0.022611 |
| TR        | 0.728460  | 0.095403       | 98.1655  | 12.85631      | 7.63558  | 0.000000 |

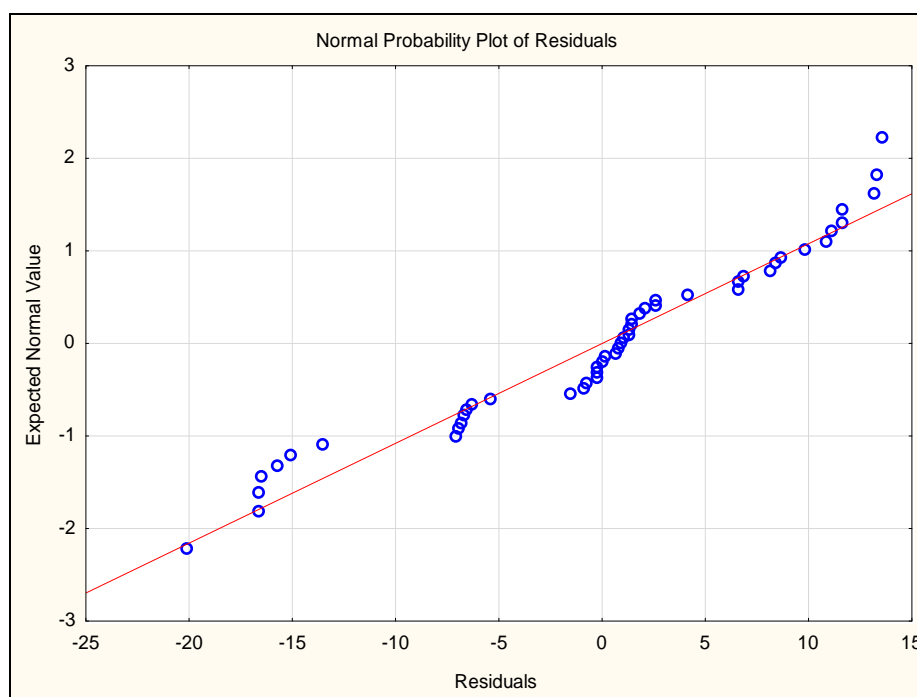


Figura 4.19 – Análise estatística de resíduos referente à análise 7.

#### 4.5.8 Análise 8 – Tempo de reação com diferentes carregamentos de rede

Para a análise 8 efetuou-se uma análise equivalente à análise 1, introdução de erro no *tempo de reação* (TR), mas com diferentes carregamentos de rede, com a matriz final de veículos ligeiros a 80%, 90%, 100%, 110% e a 120% do carregamento de referência, tal como definido em 4.3.2, estando os resultados no gráfico da Figura 4.20. Devido à geometria e dimensão da rede, e portanto, ao possível efeito adverso que bloqueios de filas possam ter no comportamento do modelo, julgou-se interessante, em paralelo com os resultados dos *tempos médios de viagem* (TMV) para cada carregamento da rede, ter os valores referentes às filas médias virtuais. Por *fila média virtual* (FMV) entende-se uma fila de veículos que já foram gerados dentro do centróide, mas que aguardam que haja espaço suficiente na rede para a sua entrada, o que acontece nos casos de a rede estar bastante saturada.



Em primeiro lugar, analisando os resultados com introdução de erro por defeito, ou seja, para carregamentos da rede inferiores ao de referência, verifica-se que os resultados para 80% e 90% são semelhantes, pelo que se pode concluir que os erros resultantes de introdução de erros por defeito com escala diferenciada, tenderão a chegar a um ponto em que serão iguais, independentemente de se ter um carregamento menor, ou grandes diferenças no tempo de reação, pressupondo-se que o tempo médio de viagem é aqui condicionado apenas pelo tamanho e características físicas da rede, assim como ciclos semaforicos. Para os carregamentos superiores ao de referência (110% e 120%) observa-se um crescimento bastante grande nos TMV para todos os valores do TR. Analisando atentamente os valores do TMV para o TR com o valor 0.75 segundos, verifica-se que para o carregamento de referência se tem um TMV na ordem dos 160 s/km, enquanto se têm 240 s/km e 350 s/km para a rede carregada a 110% e 120%, respetivamente. Nestes dois últimos nota-se que a partir do TR=1.00 segundos (valor a partir do qual o TR já começa a ser menos realista) a existência de filas virtuais vai de alguma forma afetar o comportamento geral da rede, sendo que quando existem filas virtuais com alguma expressão, o TMV diminui.

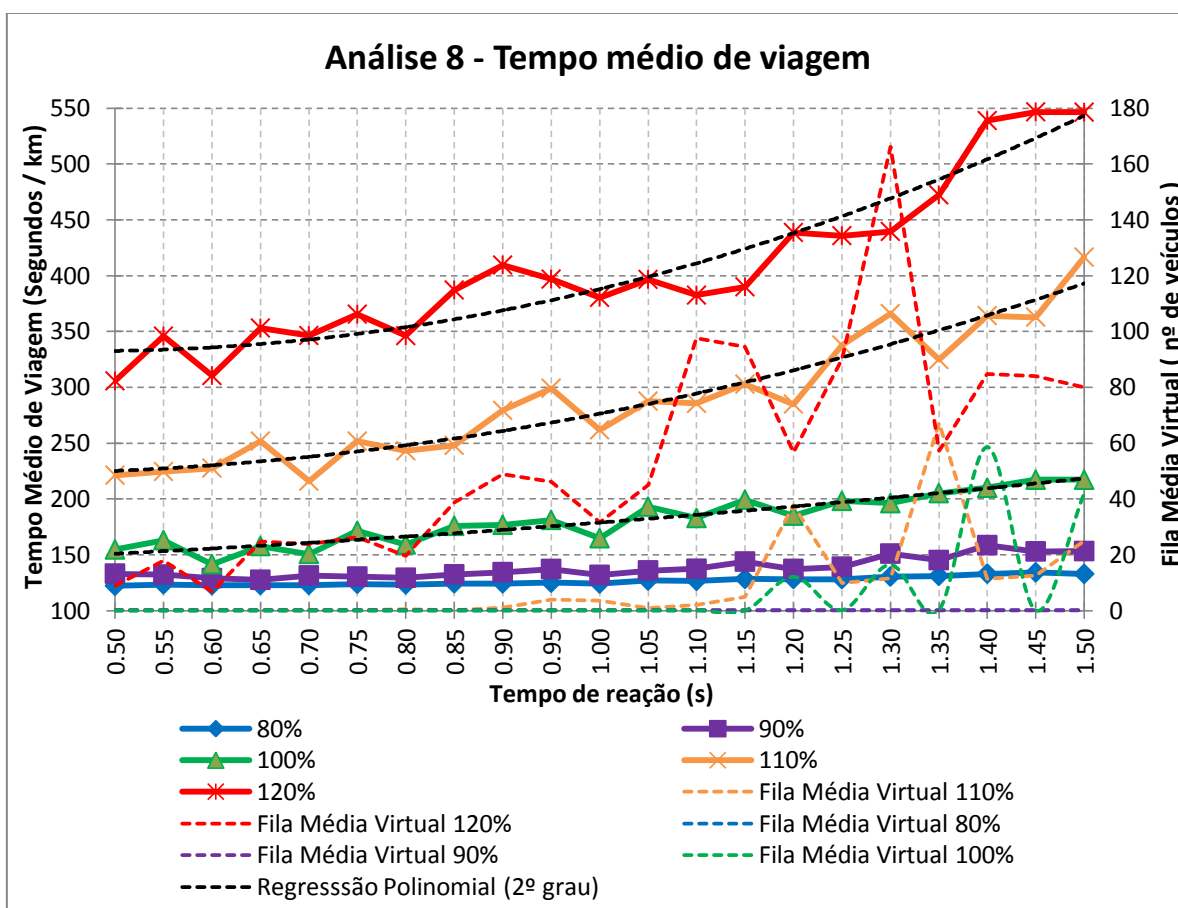


Figura 4.20 – Gráfico com os resultados do TMV para os vários carregamentos da rede na análise 8, sobrepostos com os respetivos valores de fila virtual média. (100% - Carregamento de referência).

Na Figura 4.21 podem-se observar os erros no resultado em função do erro introduzido para os diferentes carregamentos da rede, para o TR de partida nos 0.75 segundos. Constata-se que para o carregamento a 110% o erro no resultado face ao de referência aumenta mais do que para o carregamento a 120% face a 110%. Para esclarecer este facto levaram-se a cabo análises com carregamentos de 105% e 115%. Observa-se então que o comportamento destes últimos se situa entre os a 110% e 120%. Contudo os resultados díspares, para o carregamento de referência e carregamentos superiores, só se começam a fazer notar a partir de introdução de erro superior a 20%. Tal parece verificar-se devido ao facto de, a partir de determinada altura, o crescimento cada vez maior das filas virtuais, por impossibilidade de introdução dos veículos na rede, e portanto em última análise devido a uma falha na modelação, se desenvolver um efeito perverso que faz com que o número de veículos dentro do sistema acabe por ser menor, mais do que compensando o efeito expectável da majoração da matriz. Para os carregamentos inferiores ao de referência nota-se que um erro introduzido tem pouca influência no resultado, inserindo-lhe um erro bastante pequeno.

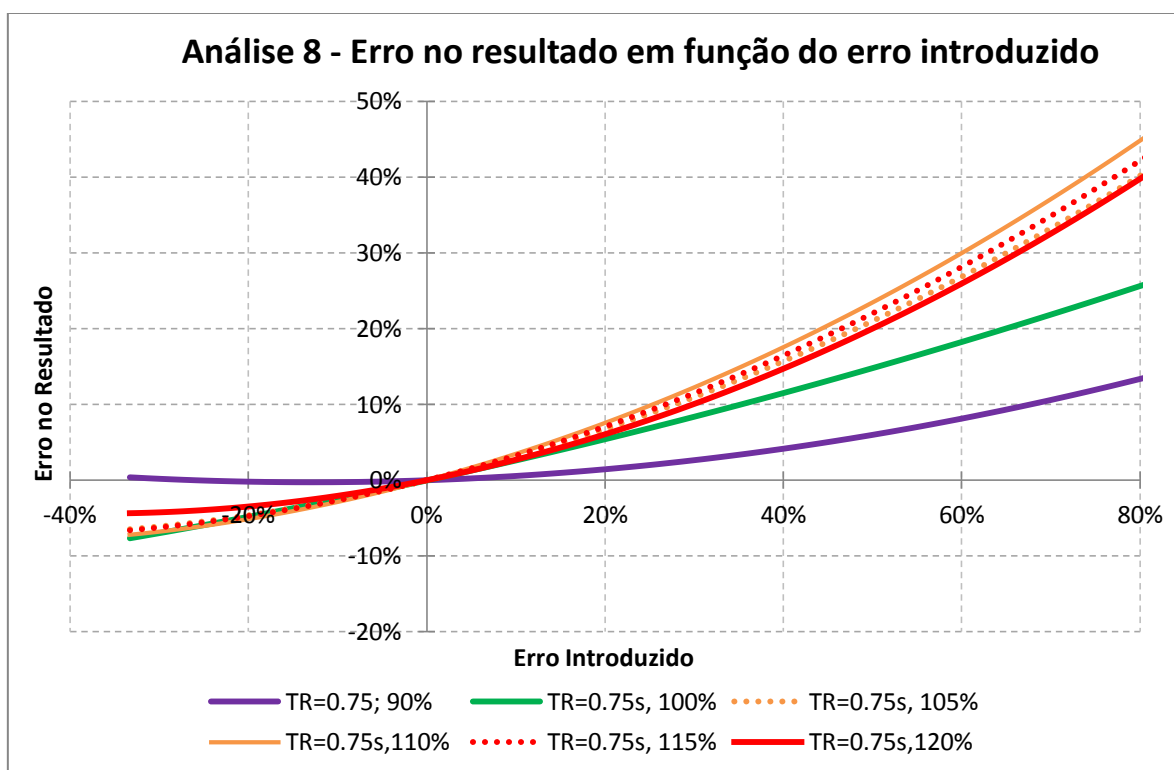


Figura 4.21 – Gráfico de comparação do erro no resultado em função do erro introduzido, resultantes da análise 8, para os diferentes carregamentos da rede. (100% - Carregamento de referência).

Desta análise deve-se em primeiro lugar concluir que o impacto dos erros de calibração é genericamente tanto maior quanto maior a carga a que a rede está sujeita. Por outro lado,

deve-se também ter em atenção que em redes onde haja possibilidade de congestionamentos, ainda que ligeiros, junto a centróides onde exista geração de veículos, pode haver um crescimento das filas virtuais que, quando significativas, podem ser um indicador de insuficiências relevantes ao nível da representação base da infraestrutura.

#### 4.5.9 Análise 9 – Tempo de reação, distância mínima entre veículos e aceleração máxima

Na análise 9 pretendeu-se, por fim, estudar a introdução de erros com combinação de três parâmetros, sendo estes o *tempo de reação* (TR), a *distância mínima entre veículos* (DMV) e a *aceleração máxima* (AMáx). Para o efeito efetuou-se uma regressão múltipla linear com estas três variáveis independentes, tendo como variável dependente o *tempo médio de viagem* (TMV), com os resultados sumariados no Quadro 4.9. Aqui verifica-se um razoável ajustamento ( $R^2=0.577$ ), evidenciando-se também a inexistência de significância estatística da variável *aceleração máxima* ( $p>0,05$ ). Ainda assim, verifica-se também, à semelhança das análises anteriores, que a DMV ( $b^*=0.717$ ) tem maior importância para o resultado que o TR ( $b^*=0.240$ ). Também se efetuou uma análise de resíduos (Figura 4.22), onde não se verifica nenhuma tendência notória, significando isto que a relação não é enviesada.

Quadro 4.9 – Resultados da regressão múltipla, para a variável dependente TMV, na análise 9.

| Statistic | Multiple R | Multiple R <sup>2</sup> | Adjusted R <sup>2</sup> | F(3,76) | p          | Std.Err. of Estimate |
|-----------|------------|-------------------------|-------------------------|---------|------------|----------------------|
| Value     | 0.75965    | 0.57707                 | 0.56038                 | 34.5665 | 3.3835E-14 | 18.4471              |

| N = 80    | b*        | Std.Err. of b* | b        | Std.Err. of b | t(76)     | p-value  |
|-----------|-----------|----------------|----------|---------------|-----------|----------|
| Intercept |           |                | 118.4212 | 36.60623      | 3.235002  | 0.001802 |
| TR        | 0.240042  | 0.074598       | 62.1572  | 19.31665      | 3.217806  | 0.001900 |
| DMV       | 0.717440  | 0.074598       | 103.2945 | 10.74034      | 9.617434  | 0.000000 |
| AMáx      | -0.068785 | 0.074598       | -9.9035  | 10.74034      | -0.922082 | 0.359404 |

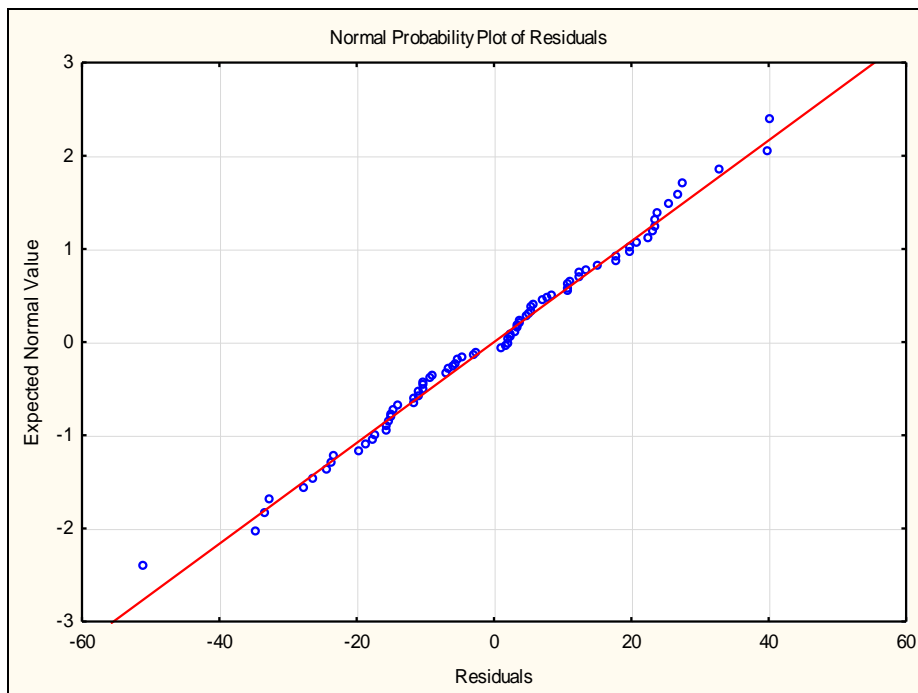


Figura 4.22 – Análise estatística de resíduos referente à análise 9.

## 5. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS DE TRABALHOS FUTUROS

### 5.1 Conclusões

Com o desenvolvimento deste trabalho procurou-se contribuir para a avaliação da fiabilidade oferecida pelos modelos de microssimulação (tendo-se optado pela aplicação *Aimsun*) assim como o grau de precisão necessário ou desejável nos parâmetros de calibração que os compõem.

Baseado na análise bibliográfica de fontes relevantes, foi definida uma metodologia de apoio ao modelador relativa ao processo de seleção dos valores a adotar para cada parâmetro de calibração. Constatou-se que a definição desses parâmetros poderá passar por 3 métodos distintos: (i) observações do campo; (ii) baseada em experiências anteriores, ou (iii) valores por defeito assumidos pelo *software*. Contudo e sempre que o modelador tenha dúvidas sobre a influência que os parâmetros assumem nos resultados modelados, é recomendável o desenvolvimento de estudos de sensibilidade.

É nesta última linha de ação que se inseriu o presente trabalho de investigação. Recorrendo a um estudo de caso real, procurou-se identificar os parâmetros de calibração que mais influenciam os resultados simulados e que, por consequência justificam a afetação de recursos para a sua estimação/medição fidedigna.

O estudo de caso selecionado procurou simular “uma realidade” tendo-se optado por uma interseção semaforizada, suportada por sessões de recolha de dados de campo para apoio à construção e calibração previa do modelo de microssimulação.

Os resultados diretos da introdução de erros em cada parâmetro separadamente, expressos nos erros resultantes ao nível dos *outputs*, mostraram um padrão que nem sempre corresponde ao que seria expectável, registando-se mesmo inconsistências pontuais caracterizadas por alguma instabilidade no andamento das curvas. Prevê-se no entanto que tal comportamento possa resultar da natureza aleatória da simulação e dos efeitos estocásticos associados à geração do tráfego. Apesar disso, as regressões aplicadas revelaram a existência de bons ajustamentos, e portanto de correlações diretas entre o erro introduzido no parâmetro de calibração e o erro medido no resultado simulado.

Por outro lado, a análise dos erros resultantes da introdução de erros em cada parâmetro separadamente revelou uma diversidade de resultados considerável.

Foram observados padrões de evolução dos erros resultantes com formas polinomiais (*tempo de reação* e *aceleração máxima*), mas também, noutros casos, padrões tendencialmente lineares (*tempo de reação em paragem* e *distância mínima entre veículos*).

De qualquer modo dentro do intervalo considerado mais comum para a introdução de erro, e para os valores padrão de partida (os *defaults* do *Aimsun*), observou-se que os erros dos resultados se repercutem com impacto diferenciado entre parâmetros, já que para o *tempo de reação em paragem* se tem uma relação de erro introduzido para o erro no resultado entre uma ordem de 4:3 e 4:4, enquanto para os outros três parâmetros esta situa-se entre uma ordem de 4:1 e 4:2.

Foi ainda possível concluir que existe um comportamento diferente do modelo para a introdução de erros segundo valores de partida (o “valor sem erro”) diferentes. No intervalo de introdução de erro, para o *tempo de reação* verificou-se uma dispersão considerável no erro resultante, enquanto que para os outros três parâmetros analisados se verificou que a questão do valor de partida não era relevante, já que todas as evoluções têm valores muito próximos entre si. Conclui-se desta forma que o efeito da variação, para estes últimos parâmetros, poderá ser previsto com alguma confiança independentemente do valor de partida, o que é importante, porque é precisamente esse valor de partida (que é o valor que se observa no campo) que é desconhecido.

Nas análises com agregação ou combinação de erros introduzidos em vários parâmetros, verificou-se primeiramente na análise com o *tempo de reação* e o *tempo de reação em paragem* que o efeito global no resultado tende a ser próximo da soma dos efeitos da análise isolada desses parâmetros, confirmando para esta combinação um efeito aditivo no erro do resultado e, portanto, sugerindo uma quase independência de efeitos.

Nas restantes análises combinadas os resultados revelaram um comportamento anormal, mas consistente ao longo da análise, nos valores limítrofes ao valor padrão de partida, verificando-se “vales” e “cumeadas”, cujo efeito também se manifestava nas análises de resíduos aplicadas. A dimensão alargada da amostra considerada, demonstra que de alguma forma os processos de cálculo internos do *software* poderão ter algum tipo de inconsistência, até porque, depois de uma verificação, não foi possível esclarecer a influência dos valores das *sementes aleatórias* neste fenómeno. Contudo as regressões lineares múltiplas aplicadas a estas análises, que têm subjacente o pressuposto de um efeito aditivo dos erros individuais, mostraram níveis e qualidade de ajustamento e correlação satisfatórios, indicando claramente a importância de cada parâmetro no comportamento do modelo.

Curiosamente, foi encontrada uma influencia, quase negligenciável do parâmetro *aceleração máxima*, tanto em comparação com o *tempo de reação* como com a *distância mínima entre veículos*. De entre estes dois, verifica-se que o parâmetro *distância mínima entre veículos* é o mais significativo, o que corresponde ao expectável, pelo facto de se ter optado por uma interseção semaforizada, com constante formação de filas ao longo de todo o período de simulação, onde este parâmetro tem grande influência.

Ainda se realizou a análise onde se procurou verificar se o impacto dos erros varia em função do nível de carregamento da rede. Conclui-se que existe variação que acontece de modo diferenciado, sendo que genericamente o impacto dos erros aumenta com o aumento da carga da rede. O mesmo acontece no sentido inverso, mas havendo uma estabilização dessa variação a determinada altura, que no caso estudado aconteceu entre os 80% e 90% do carregamento de referência. Estes resultados mostram que para redes pouco carregadas o efeito do nível de carregamento da rede, embora existente, é moderado, mas que este efeito se acentua para níveis mais elevados de carga sobre a rede.

No entanto, à medida que se aumenta carga sobre a rede, verifica-se que a partir de um certo ponto se observa um aumento muito significativo de filas virtuais nos centróides, condicionando o comportamento da simulação e com efeitos adversos ao “normal” funcionamento desta. Daqui concluiu-se que para o caso de se ter um modelo com possível formação de filas próximo de centróides geradores de tráfego, deverão ser monitorizados de perto os indicadores de tamanho de filas virtuais, que se atingirem níveis significativos deverão levar à introdução de modificações na caracterização das dimensões e topologia da rede.

## 5.2 Recomendações para trabalhos futuros

Após a realização deste trabalho, é possível sugerir algumas recomendações para trabalhos futuros. Primeiramente sugere-se a avaliação da importância, ainda que menor, de outros parâmetros aqui não analisados, recorrendo, preferencialmente, a técnicas de análise de variância (ANOVA, por ex.).

De interesse será também a avaliação de uma infraestrutura de dimensão semelhante à do presente trabalho, mas com interseção(ões) não regulada(s) por sinais luminosos, havendo, portanto, situações de cedência de passagem. Desse modo será possível analisar os parâmetros referentes ao modelo de *gap acceptance*.

De grande interesse será a comparação entre os resultados para diferentes infraestruturas, como: interseções semaforizadas, interseções com cedência de passagem, vias em ambiente suburbano/rural, redes com tamanho suficiente onde se analisem os parâmetros de calibração referentes à escolha de rotas, entre outros. Com isso poderá ser possível tirar conclusões acerca da variabilidade da importância de cada parâmetro para cada situação e cada tipo de rede. Será especialmente útil para uma melhor avaliação dos processos de calibração local e global dos modelos.

Referente ao estudo onde se procurou verificar se o impacto dos erros varia em função do nível de carregamento da rede, seria interessante fazer uma associação de uma taxa de saturação da rede aos comportamentos observados. Desta forma poderá-se avaliar a partir de que valor da taxa de saturação das redes os impactos dos erros se tornam particularmente relevantes.

Nos *outputs* do *Aimsun* os resultados (indicadores) são apresentados apenas na forma de média. Considera-se que esta limitação condiciona uma avaliação aprofundada do comportamento da aplicação e dos seus modelos, já que avaliações incluindo também os valores medianos, ou de vários percentis diferentes, iriam trazer uma grande melhoria no processo de análise. Como tal, sugere-se que sejam criados instrumentos no próprio *Aimsun* (uso de APIs, ou *scripting*) com o propósito de exatamente obter esses resultados.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO. (2001). *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets, 4<sup>th</sup> Edition*, Washington, D.C., USA: American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO).
- Austrroads. (2006). *The use and application of microsimulation traffic models - Austrroads Research Report AP-R286/06*. Sydney NSW, Australia: Austrroads Incorporated.
- Austrroads. (2007). *Microsimulation Standards - Technical Note 2*. Victória, Australia: ARRB Group Ltd.
- Barceló, J. (2002). Dynamic Network Simulation With AIMSUN. *International Symposium on Transport Simulation*. Yokohama.
- Bastos Silva, A. M. (2004). *"Definição de uma metodologia de concepção de cruzamentos giratórios" Tese de doutoramento*. Coimbra: Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra.
- Bonneson, J. A. (1992). *Modeling Queued Driver Behaviour at Signalized Junctions - Transportation Research Record 1365*. Washington, D.C., USA: Transportation Research Board.
- Ciuffo, B., Miola, A., Punzo, V., & Sala, S. (2012). *Dealing with uncertainty in sustainability assessment*. Luxembourg: Joint Research Centre - European Commission.
- Correia, G. (2011). *Aulas de Planeamento de Transportes, Mestrado Integrado em Engenharia Civil*. Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra.
- Costa, A. P. (2008). *Manual de Planeamento das Acessibilidades e da Gestão Viária - Vol.2 - Correntes de Tráfego*. Porto: Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Norte.
- Dewar, R., & Olson, P. (2007). *Human Factors in Traffic Safety*. Tucson, USA: Lawyers & Judges.
- FHWA. (2004). *Traffic Analysis Toolbox Volume III - Guidelines for Applying Traffic Microsimulation Modeling Software*. McLean, VA, United States: FHWA - Federal Highway Administration.
- FHWA/TRB. (2012). *Revised Monograph on Traffic Flow Theory (1975-2012)*. Washington, D.C., USA: FHWA - Federal Highway Administration.
- Highways Agency. (2007). *Guidelines for the Use of Microsimulation Software*. Edinburgh: Department for Transport.
- Hollander, Y., & Liu, R. (2008, May 2008, Volume 35, Issue 3, pp 347-362). The principles of calibrating traffic microsimulation. *Transportation - Springer*, Volume 35, Issue 3, pp 347-362.

- Hoogendoorn, S., & Bovy, P. (2001). State-of-the-art of Vehicular Traffic Flow Modelling. *Proceedings of the IMECH Engineers Part I: Journal of Systems & Control Engineering, Professional Engineering Publishing*, 283-303.
- Lamm, R., Psarianos, B., & Mailaender, T. (1999). *Highway Design and Traffic Safety Engineering Handbook*. New York, NY, USA: McGraw - Hill.
- Luttinen, T. (2004). *Capacity and Level of Service at Finnish Unsignalized Intersections*. Helsinki: Finnish Road Administration.
- Ortúzar, J., & Willumsen, L. (2001). *Modelling Transport* (3<sup>a</sup> Edition ed.). West Sussex, England: John Wiley & Sons.
- Punzo, V., & Ciuffo, B. (2009). How Parameters of Microscopic Traffic Flow Models Relate to Traffic Dynamics. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 249–256.
- Rienstra, S. A., & Rietveld, P. (1996). Speed Behaviour of Car Drivers: A Statistical Analysis of Acceptance of Changes in Speed Policies in the Netherlands. (E. S. Ltd, Ed.) *Transportation Research - D. Vol 1, No.2*, pp. 97-110.
- TRB. (2000). *HCM - Highway Capacity Manual*. Washington D.C., USA: Transportation Research Board – National Research Council.
- TSS. (2012a). *Aimsun 7 Dynamic Simulators User's Manual*. TSS – Transporting Simulation Systems.
- TSS. (2012b). *Aimsun 7 Users' Manual*. TSS – Transporting Simulation Systems.
- Vasconcelos, L. (2004). *"Modelos de atribuição/simulação de tráfego: O impacto na qualidade dos resultados de erros no processo de modelação"* Tese de Mestrado. Coimbra: Universidade de Coimbra.