

# ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS PARÂMETROS COMPORTAMENTAIS DO MICROSSIMULADOR TRANSMODELER NA MODELAGEM DA VELOCIDADE MÉDIA DE UMA VIA ARTERIAL: ESTUDO DE CASO DE FORTALEZA

Alessandro Macêdo de Araújo  
André Luis Medeiros  
Janailson Queiroz Sousa  
Roberto Matheus Nunes Torquato  
Transitar Engenharia e Consultoria

## RESUMO

A escolha dos parâmetros a serem calibrados é uma etapa essencial da microsimulação de tráfego, principalmente devido à complexidade desses modelos. Este estudo tem como objetivo geral definir os parâmetros mais relevantes do simulador TransModeler para a modelagem de um corredor arterial, utilizando a velocidade média como medida de desempenho. O método empregado consistiu em compreender e selecionar os principais parâmetros, classificar em calibráveis ou possíveis de serem obtidos em campo, realizar a análise de sensibilidade dos calibráveis e identificar aqueles com maior impacto na medida de desempenho, utilizando como estudo de caso uma via arterial da cidade de Fortaleza. Os resultados indicaram que os parâmetros  $\beta$  e  $\gamma$  do modelo de *car-following* e o *headway buffer* exercem influência significativa na velocidade média. Dentre as limitações da análise, estão a consideração apenas da diferença absoluta entre as velocidades médias e a ausência da análise de interdependência entre os parâmetros.

## ABSTRACT

The choice of the parameters to be calibrated is an essential step of the traffic microsimulation, mainly due to the complexity of these models. This study aims to define the most relevant TransModeler simulator's parameters for the modeling of an arterial corridor, using the average speed as a measure of performance. The applied method consists of understanding and selecting the main parameters, classifying in calibratable or possible to be obtained in the field, performing the sensitivity analysis and identifying those with the greatest impact on the performance measure, using as a case study an arterial road of Fortaleza city. The results indicated that  $\beta$  and  $\gamma$  parameters of the car-following model and the headway buffer have significant influence on the average speed. Among the analysis' limitations, there are the consideration of only the absolute difference between the average speeds and the absence of interdependence analysis between the parameters.

## 1. INTRODUÇÃO

Os pacotes de microsimulação têm se tornado importantes ferramentas de modelagem para vários aspectos de planejamento e operação de transportes (Spiegelman, 2011). Esses pacotes, quando usados de forma adequada, fornecem um embasamento para tomada de decisão no planejamento de transportes nos níveis estratégico, tático e operacional (Lacerda, 2016). A microsimulação pode ser bastante útil na avaliação de alternativas para sistemas de transportes em condições nas quais as técnicas analíticas não podem ser empregadas ou não existem, além de considerar aspectos microscópicos como o comportamento do condutor e características dos veículos (Elefteriadou, 2014).

Vários microsimuladores de tráfego estão disponíveis no mercado e, portanto, cabe ao analista selecionar o pacote mais adequado para a realização do estudo. Elefteriadou (2014) indica três aspectos relevantes para a escolha do microsimulador mais apropriado: adequação do simulador ao escopo do projeto; algoritmos e modelos aplicados pelo simulador; e facilidade de uso e familiaridade com a ferramenta. Alguns *software*, por serem mais recentes, ainda não tiveram seus aspectos amplamente discutidos e, portanto, a comunidade ainda desconhece os possíveis pontos positivos e negativos que estes podem promover na modelagem do tráfego. Dentre esses pacotes computacionais, encontra-se o TransModeler, que é um simulador híbrido (macro, meso e microscópico) desenvolvido pela empresa americana Caliper.

Um dos poucos estudos encontrados na literatura a respeito dos parâmetros do TransModeler é o de Jiménez *et al.* (2016), no qual foi apresentado um *software* desenvolvido para realizar a seleção dos parâmetros com base na análise de variância (ANOVA) e a calibração através de algoritmos genéticos. A fundamentação do estudo é basicamente estatística, havendo pouco destaque para a compreensão teórica dos parâmetros, que também é muito importante no desenvolvimento de um modelo de simulação de tráfego. Já no trabalho da California PATH (2012), os principais parâmetros de calibração considerados para a microssimulação de corredores foram aqueles que determinam o *headway* médio de *car-following*, tempo médio de reação do motorista e comportamento de mudança de faixa e aceitação de brechas, mas não foi apresentado o processo detalhado de seleção desses parâmetros.

Com o intuito de contribuir para um melhor entendimento dos parâmetros do TransModeler e de suas influências em medidas de desempenho de tráfego, este estudo tem como objetivo geral definir os parâmetros mais relevantes para a modelagem de um corredor arterial, utilizando a velocidade média como medida de desempenho. O corredor selecionado compreende um trecho de 1,5 km da Av. Pontes Vieira, na cidade de Fortaleza, que possui sentido duplo de circulação e duas faixas de tráfego por sentido, separados por um canteiro central. Para atingir o objetivo geral, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Compreender os parâmetros do modelo;
- Selecionar os parâmetros com maior potencial de relevância para a modelagem;
- Classificar os parâmetros em possíveis calibráveis ou coletáveis em campo;
- Realizar a análise de sensibilidade; e
- Definir os parâmetros com maior influência.

## 2. MODELAGEM MICROSCÓPICA DE TRÁFEGO

Os microssimuladores de tráfego procuram representar a interação entre o sistema físico (a oferta) e os usuários (a demanda). Esses modelos são apresentados como micro porque eles operam no nível da unidade (o veículo ou a pessoa, por exemplo). Esses também são considerados como simulação porque buscam modelar os processos internos do sistema (decisão dos motoristas, características dos veículos, operação semaforica, etc.) e não simplesmente os dados de saída do sistema (Spiegelman, 2011).

De acordo com Elefteriadou (2014), são basicamente três algoritmos os componentes principais de um simulador de tráfego: *car-following* (seguimento veicular), *lane-changing* (mudança de faixa) e *gap-acceptance* (aceitação de brecha). O modelo de *car-following* busca representar a trajetória do veículo seguidor em função do comportamento do veículo líder. O modelo de *lane-changing* replica o processo de mudança de faixa, desde a decisão em realizar a mudança de faixa até o momento em que a mudança é efetuada. Por fim, o modelo de *gap-acceptance* se refere ao processo de selecionar e utilizar uma brecha quando o veículo está atravessando uma via principal ou quando necessita realizar uma mudança de faixa. Os microssimuladores apresentam também uma quantidade considerável de parâmetros de outros submodelos (ex: o de movimentos laterais) e de performance e classificação veicular.

Com a finalidade de utilizar pacotes de simulação como um substituto experimental do sistema real, a confiabilidade do processo depende da habilidade em produzir um modelo de simulação que represente o comportamento do sistema de maneira suficientemente similar (Barceló e Casas, 2004). Os parâmetros desses modelos possuem valores *default* que representam

realidades, muitas vezes, distintas do local em que estão sendo aplicados. Para que esses modelos se adequem ao comportamento do tráfego local, é necessário executar três etapas: verificação, calibração e validação.

O processo de verificação ocorre ao avaliar se os dados de entrada têm sido aplicados de forma correta e se o *software* replica a rede de forma adequada (Elefteriadou, 2014). O processo de calibração consiste no ajuste dos parâmetros para aprimorar a capacidade do modelo em reproduzir o comportamento dos motoristas locais e as características de performance veiculares (Dowling *et. al.*, 2004). A validação, por fim, é a etapa realizada para avaliar se o modelo de simulação supostamente calibrado representa satisfatoriamente o sistema em estudo (Barceló, 2010), podendo ser realizada tanto em relação ao tempo quanto ao espaço (Bessa-Júnior *et al.*, 2017).

Conforme citado por Medeiros (2012), considerando a evolução tecnológica dos modelos de simulação, esses processos de calibração e validação são bastante complexos devido ao maior nível de detalhamento buscado pelos simuladores de tráfego, principalmente quando se trata de microssimuladores, incidindo diretamente no aumento do número de parâmetros a serem calibrados, assim como no número de funções a serem utilizadas para representar determinados comportamentos. Sendo assim, o analista deve selecionar um conjunto de parâmetros adequados para a calibração da rede em estudo. Para isso, Hollander e Liu (2008) dividem os parâmetros em cinco classificações:

- Parâmetros cujo valores podem ser medidos de forma direta;
- Parâmetros que podem ser obtidos na literatura e que são replicáveis ao local de estudo;
- Parâmetros em que a influência aos dados de saída pode ser considerada dispensável;
- Parâmetros em que o ajuste é desnecessário devido aos tipos dos dados de entrada; e
- Todos os parâmetros restantes devem ser incluídos no conjunto de calibração.

### **3. MÉTODO EMPREGADO**

O método adotado neste trabalho é composto por quatro etapas. A primeira consiste em compreender e selecionar os parâmetros potencialmente mais relevantes, utilizando como critérios o conceito do parâmetro e a percepção prévia quanto à sua possível influência na medida de desempenho a ser estimada, visto que o microssimulador apresenta uma quantidade considerável de parâmetros ajustáveis. Após a seleção, os parâmetros foram classificados em calibráveis ou possíveis de serem obtidos em campo.

Como terceira etapa, foi realizada a análise de sensibilidade dos parâmetros selecionados e classificados como calibráveis. Foi simulada a rede com os dados de entrada (demanda e controle semaforico, entre outros), obtendo a velocidade média na situação *default* dos parâmetros calibráveis. Após esse estágio, alteraram-se os parâmetros selecionados, um por vez, em quatro níveis distintos com base no valor *default*, obtendo a velocidade média do corredor arterial para cada caso. Com a obtenção dos parâmetros que mais impactaram a velocidade média, realizou-se uma segunda análise de sensibilidade mais refinada, finalizando a identificação dos parâmetros que exercem influência significativa na velocidade média do corredor arterial. A sequência do método está apresentada na Figura 1.



**Figura 1:** Método empregado

## 4. COMPREENSÃO E SELEÇÃO DOS PARÂMETROS DO TRANSMODELER

Este tópico tem o intuito de apresentar a definição dos parâmetros que foram selecionados a partir da percepção prévia dos autores, excluindo aqueles cuja possibilidade de influência na velocidade média do corredor é ínfima ou que não fazem sentido neste tipo de modelagem.

### 4.1. Performance e classificação veicular

#### 4.1.1. *Vehicle fleet*

É notável a influência da frota veicular nas principais medidas de desempenho de tráfego que são comumente utilizadas. O TransModeler possui uma distribuição de dados de entrada denominada *vehicle fleet composition*, que busca representar a composição veicular do local em estudo, dado em porcentagem para cada tipo de veículo. O TransModeler apresenta, no seu *default*, três opções de carro de passeio (PC1, PC2 e PC3) que se distinguem por características como razão massa/força (desempenho) e tamanho. Também há motocicletas, bicicletas e veículos pesados como ônibus convencional ou articulado e caminhões de diferentes tipos.

#### 4.1.2. *Vehicle lengths and widths*

Para representar o tamanho de cada tipo de veículo, o TransModeler possui uma tabela com valores, em metros, de largura e comprimento veicular, podendo ser alterada pelo modelador. Considera-se também uma variação dessas medidas através do desvio padrão, com valores máximos e mínimos estabelecidos. As extensões dos veículos influenciam na ocupação viária e, portanto, nas medidas de desempenho de tráfego.

#### 4.1.3. *Vehicle typical mass*

Outro parâmetro que influencia na performance do veículo é a sua massa, que limita a sua capacidade de desaceleração, aceleração e velocidade máxima. Para incorporar a variabilidade dessa característica em uma mesma classe veicular, especifica-se também desvio padrão e os valores máximo e mínimo.

### 4.2. Parâmetros gerais de *driver behavior*

#### 4.2.1. *Gaps between stopped vehicles*

Este parâmetro representa o espaçamento entre veículos quando parados e influencia, por exemplo, no tempo de descarregamento de uma fila de veículos em interseções semaforizadas. O TransModeler utiliza uma distribuição normal truncada com limite inferior para representar esse espaçamento. Também há uma distinção nas situações em que o veículo à frente é pesado (*heavy-vehicle*) ou não (*non-heavy*).

#### 4.2.2. *Desired speed*

Outro parâmetro importante é a velocidade desejada dos condutores, que busca representar a velocidade dos veículos quando estes estão em condições de fluxo livre. Define-se uma distribuição discreta através de segmentos populacionais, correspondendo a valores de desvio em relação à velocidade limite da via. Desta forma, caso um veículo seja gerado com valor de -5 km/h, este terá sua velocidade desejada de 55 km/h em vias com velocidade regulamentada

de 60 km/h. É possível ainda atrelar uma distribuição de velocidade desejada apenas para determinadas classes funcionais de via.

#### 4.2.3. *Public transportation*

Nas grandes cidades brasileiras, a quantidade de ônibus é expressiva, sendo necessário modelar adequadamente aspectos intrínsecos a este modo. Especialmente em faixas de tráfego misto, a existência de ônibus urbanos influencia fortemente no desempenho da oferta viária, devido à sua baixa velocidade operacional. O TransModeler permite a modelagem do tempo de parada do transporte público nos pontos de ônibus, que impacta no desempenho do tráfego, através de três parâmetros: *dead time* (tempo de abertura e fechamento das portas), *alighting* (tempo de desembarque por passageiro) e *boarding* (tempo de embarque por passageiro).

#### 4.2.4. *Headways thresholds*

No microssimulador TransModeler há três regimes de tráfego: velocidade de fluxo livre ou desejada, *car-following* e emergencial. Para o simulador identificar em qual regime o veículo está, são adotados *headways thresholds* que são limiares de *headway* especificados pelo analista. São definidos o limite inferior (*lower bound*) e superior (*upper bound*), em segundos. Caso o *headway* em relação ao veículo a frente esteja dentro dos limites estabelecidos, o veículo em questão estará em regime de *car-following*; caso esteja acima do *upper bound*, o veículo estará em regime de fluxo livre e, por fim, caso esteja abaixo do *lower bound*, este estará em regime emergencial.

#### 4.2.5. *Headways buffer*

Quando os veículos estão em seguimento, os condutores mantêm uma distância mínima de segurança em relação ao veículo da frente. O TransModeler representa esse espaçamento como um somatório da distância entre veículos parados (*gaps between stopped vehicles*) com uma parcela que é função da velocidade, sendo esta última dada pela multiplicação entre a velocidade do veículo seguidor e o *headway buffer*, como apresentado na Equação 1.

$$d = s_{gap} + v * h_b \quad (1)$$

em que  $d$ : espaçamento mínimo de segurança entre veículos [m];  
 $s_{gap}$ : espaçamento entre veículos parados [m];  
 $v$ : velocidade do veículo seguidor [m/s];  
 $h_b$ : *headway buffer* [s].

### 4.3. Modelos comportamentais (*driver behavior*)

#### 4.3.1. *Modelo de car-following*

Um dos principais modelos de um microssimulador de tráfego é o *car-following*, sendo este um dos mais abordados pela comunidade acadêmica pela forte influência nas principais medidas de desempenho. A literatura apresenta vários modelos de *car-following*; o TransModeler aplica um desenvolvido nos laboratórios da General Motors, cuja premissa é de que a resposta do veículo seguidor (a sua aceleração) é dada por um estímulo (diferença de velocidade e espaçamento, por exemplo) e pela sensibilidade do condutor (os parâmetros). A formulação do *car-following* aplicado no TransModeler 4.0 é apresentada na Equação 2.

$$A_i [t + \Delta t] = \alpha \frac{v_i^\beta [t]}{D_{i,i-1}^\gamma [t]} (V_{i-1}[t] - V_i[t])^\theta + \epsilon_i^{CF} \quad (2)$$

em que:  $A_i[t+\Delta t]$ : taxa de aceleração ou desaceleração do veículo seguidor [ $\text{m/s}^2$ ];  
 $V_i[t]$ : velocidade do veículo seguidor [ $\text{m/s}$ ];  
 $V_{i-1}[t]$ : velocidade do veículo líder [ $\text{m/s}$ ];  
 $D_{i,i-1}$ : distância entre o veículo líder e o veículo seguidor [ $\text{m}$ ];  
 $\alpha, \beta, \gamma$  e  $\theta$ : parâmetros do modelo;  
 $\varepsilon_i^{CF}$ : erro específico do motorista seguidor para o regime de *car-following*.

O TransModeler permite utilizar valores diferentes desses parâmetros para a aceleração e a desaceleração, totalizando 8 parâmetros desse modelo possíveis de serem calibrados.

#### 4.3.2. Modelo de lane-changing

O comportamento de mudança de faixa é um dos elementos mais críticos de um microssimulador de tráfego (Caliper, 2014). O TransModeler modela a mudança de faixa em três passos: seleção das faixas de tráfego elegíveis; tomada de decisão da faixa selecionada; e avaliação das brechas e execução da mudança. Esses três passos verificam a viabilidade, o desejo e a segurança da mudança de faixa, respectivamente.

O modelo de mudança de faixa é dividido em três regimes: discricionária, mandatória e forçada. A mudança de faixa discricionária ocorre para alcançar uma melhoria percebida das condições de condução, como o aumento da velocidade, e é modelada através de uma função utilidade onde os parâmetros são coeficientes que definem os pesos de diversas variáveis consideradas na decisão de troca de faixa. A mudança de faixa mandatória é aquela realizada por alguma necessidade, para permitir um movimento de conversão, por exemplo; nesse caso, o regime mandatório se inicia quando o veículo se encontra numa faixa que não lhe permitirá realizar a conversão e a uma distância igual ou inferior ao parâmetro *critical distance* em relação ao local de mudança de direção. O regime de mudança de faixa forçada é aplicado quando o motorista não consegue uma brecha aceitável para realizar uma mudança de faixa necessária em um período de tempo pré-definido ou quando ele se encontra muito próximo do local de conversão, por exemplo.

#### 4.3.3. Modelo de gap-acceptance for lane-changing

Uma vez que o condutor decidiu realizar a mudança de faixa, este irá avaliar as brechas na faixa de tráfego selecionada e decidir se é seguro executar a manobra. A brecha é considerada aceitável quando esta é superior à brecha mínima necessária determinada pelo modelo. Esse modelo divide a brecha da faixa escolhida em dois tipos: *lead gap* (em relação ao veículo que se tornará líder após a mudança de faixa) e *lag gap* (em relação ao veículo mais próximo da faixa escolhida localizado longitudinalmente a montante do veículo em questão).

O valor mínimo aceitável das brechas de *lead* e de *lag*, ou brechas críticas, variam não apenas em relação aos motoristas, mas também para diferentes condições de tráfego. A brecha crítica também varia dependendo do tipo de mudança de faixa, ou seja, se esta é discricionária ou mandatória. Por exemplo, condutores que desejam realizar uma mudança de faixa com o objetivo de acessar uma rampa de saída de uma rodovia aceitarão brechas menores em relação a condutores que desejam realizar mudança de faixa apenas para aumentar a velocidade.

#### 4.3.4. Modelo de gap-acceptance para interseções não semaforizadas

Outro fenômeno importante para a representação do tráfego urbano é a aceitação de brechas em interseções não-semaforizadas (INS). Quando o veículo se aproxima ou então para e espera na

faixa de retenção da via secundária, o condutor avalia o *headway* estimado (em segundos) entre a conclusão da sua travessia e o instante de chegada do veículo conflitante na interseção. Se esta folga estimada for maior do que o *critical headway* estabelecido, o motorista irá proceder.

O TransModeler diferencia a aceitação de brecha para veículos que desejam realizar movimentos de *crossing* e de *merging*. O movimento de *merging* acontece quando o veículo da via secundária deseja se inserir na via principal, enquanto o movimento de *crossing* ocorre quando o veículo cruza o fluxo principal, seja a partir da aproximação secundária ou ao realizar uma conversão à esquerda a partir da via principal quando esta tem duplo sentido de circulação. Espera-se que os valores de *critical headway* sejam diferentes para os movimentos de conversão, assim como no manual americano HCM2010 (TRB, 2010).

## 5. CLASSIFICAÇÃO DOS PARÂMETROS SELECIONADOS

Após compreender a definição dos parâmetros existentes no TransModeler e ter selecionado aqueles cujo potencial de influência na velocidade média é considerável, seguiu-se com a classificação dos parâmetros. Nesta classificação, os parâmetros selecionados foram divididos em: possíveis de serem obtidos em campo ou calibráveis. Apresenta-se, na Tabela 1, os parâmetros classificados como possíveis de serem obtidos em campo, pois seus conceitos representam características diretamente observáveis.

**Tabela 1:** Parâmetros possíveis de serem obtidos em campo

Parâmetro	Tipo de modelo
<i>Vehicle fleet</i>	Performance e classificação veicular
<i>Vehicle lengths and widths</i>	Performance e classificação veicular
<i>Vehicle typical mass</i>	Performance e classificação veicular
<i>Gap between stopped vehicles</i>	<i>Driver behavior / General parameters</i>
<i>Desired speed</i>	<i>Driver behavior / General parameters</i>
<i>Dead time / Alighting / Boarding (Public transportation)</i>	<i>Driver behavior / General parameters</i>

Como apresentado na tabela acima, os parâmetros possíveis de serem obtidos diretamente são três de performance e classificação veicular (ou quatro, se o comprimento e a largura forem contabilizados separadamente) e outros cinco parâmetros gerais de comportamento do motorista. Esta forma direta de ajuste dos parâmetros é a mais adequada para a modelagem, visto que é de se esperar uma maior confiabilidade nos valores coletados em comparação aos valores obtidos por calibração, por exemplo.

Na Tabela 2 são exibidos os parâmetros classificados como possíveis calibráveis. O modelo de mudança de faixas utilizado foi o *neighboring lane model*, que é o modelo *default* do TransModeler e que considera a mudança de faixa passo a passo entre as faixas de tráfego adjacentes; já o modelo de aceitação de brechas para mudança de faixa utilizado foi o NGSIM, que é o modelo *default* do TransModeler 4.0.

Dentre os possíveis parâmetros calibráveis, todos são referentes aos modelos comportamentais, sendo dois parâmetros gerais, quatro parâmetros de *car-following*, seis de *discretionary lane-changing*, um de *mandatory lane-changing* e oito de *gap-acceptance model* para mudança de faixa. Apesar de alguns parâmetros possuírem um significado fenomenológico e/ou físico, estes

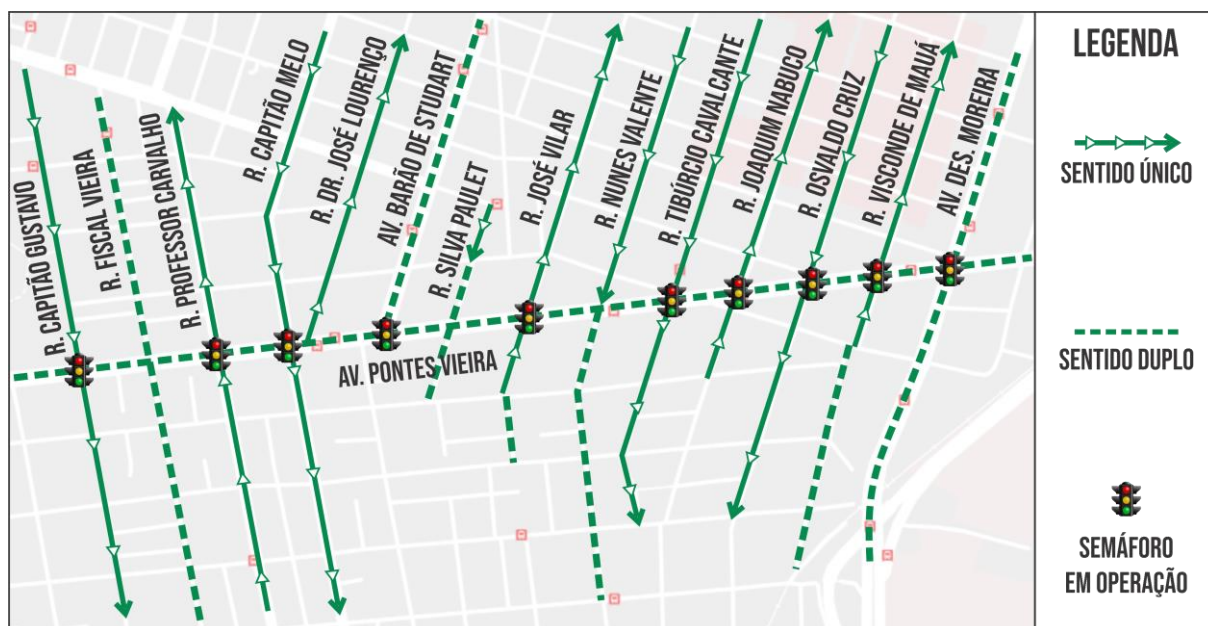
são de difícil ou de impossível obtenção em campo de forma direta, sendo necessário obter seus valores através de um processo de calibração.

**Tabela 2:** Parâmetros possíveis calibráveis

Parâmetro	Tipo de modelo
<i>Headway thresholds / Headway buffer</i>	<i>Driver behavior / General parameters</i>
<i>Alpha (<math>\alpha</math>) / Beta (<math>\beta</math>) / Gamma (<math>\gamma</math>) / Teta (<math>\theta</math>)</i>	<i>Driver behavior / Car-following model</i>
<i>Path Influence Factor / Minimum speed gain / Average speed gain / Heavy vehicle ahead / Lane not connected / Same Dir. as Previous</i>	<i>Driver behavior / Discretionary lane-changing model (DLC)</i>
<i>Critical distance</i>	<i>Driver behavior / Mandatory lane-changing model (MLC)</i>
<i>Minimum accepted gap (lead and lag vehicle) / alpha (lead and lag vehicle)</i>	<i>Driver behavior / Gap-acceptance model / Discretionary lane-changing</i>
<i>Minimum accepted gap (lead and lag vehicle) / alpha (lead and lag vehicle)</i>	<i>Driver behavior / Gap-acceptance model / Mandatory lane-changing</i>

## 6. CASO DE ESTUDO

Foi realizada uma análise de sensibilidade dos parâmetros calibráveis, utilizando como estudo de caso um trecho do corredor da Av. Pontes Vieira, situado em Fortaleza-CE. Ao longo desse trecho, a maioria dos cruzamentos são semaforizados, excetuando-se apenas as interseções formadas nas ruas Fiscal Vieira, Dr. José Lourenço, Silva Paulet e Nunes Valente, como mostrado na Figura 2. O uso do solo nesse corredor é principalmente comercial, contendo farmácias, restaurantes/lanchonetes, postos de gasolina, mercadinhos, bancos, dentre outros empreendimentos.



**Figura 2:** Trecho da Av. Pontes Vieira utilizado como estudo de caso



A coleta foi realizada no dia 19/10/2016, de 07h às 09h, porém foram utilizados os dados de demanda e programação semafórica referentes apenas ao período de 07h às 08h. A pesquisa consistiu na coleta classificatória de volumes de conversão em cada uma das interseções do corredor, observações de tempo de viagem, velocidade média e velocidade desejada.

## 7. RESULTADOS

A análise de sensibilidade foi realizada individualmente para cada parâmetro classificado como calibrável, ou seja, variando um por vez enquanto os demais permaneceram com seus valores *default*, a fim de avaliar o efeito isolado de cada um na medida de desempenho do tráfego adotada: a velocidade média, medida mais utilizada para representar o nível de serviço de um corredor.

Foram considerados 4 níveis de valores (além do *default*) para cada parâmetro, sendo adotadas porcentagens de 33%, 50%, 150% e 200% em relação ao *default*, exceto quando esses valores representaram condições irreais na percepção dos autores. Quanto aos parâmetros definidos através de distribuição, os 4 níveis foram estabelecidos com um valor populacional único com base no valor médio *default*. Para cada cenário (cada nível dos parâmetros), foram realizadas 5 simulações. Os resultados da análise de sensibilidade dos parâmetros de *car-following*, dos parâmetros gerais de *driver behavior*, de *lane-changing* e de *gap-acceptance*, para cada sentido de circulação da avenida (L-O: Leste-Oeste; O-L: Oeste-Leste), estão apresentados nas Tabela 3, Tabela 4, Tabela 5 e Tabela 6, respectivamente.

No caso do corredor em estudo, os resultados indicaram que, dado os valores adotados para cada um deles, os parâmetros  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  (principalmente os dois últimos) do modelo de *car-following* e o *headway buffer* foram os que mais afetaram, individualmente, a velocidade média em cada sentido de tráfego do corredor, com diferenças absolutas de até 1,0 km/h no caso do parâmetro  $\alpha$ , 5,7 km/h para o  $\beta$  e 2,2 km/h no caso do  $\gamma$  e do *headway buffer* em relação à velocidade média no cenário *default*.

**Tabela 3: Resultados da análise de sensibilidade dos parâmetros de *car-following* (CF)**

Parâmetro	Análise de Sensibilidade individual (1 por vez) - Parâmetros de <i>car-following</i>																						
	Default		Nível 1				Nível 2				Nível 3				Nível 4								
	Valor	Velocidade média		Valor	Velocidade média		Diferença V.M.		Valor	Velocidade média		Diferença V.M.		Valor	Velocidade média		Diferença V.M.						
	L-O	O-L	L-O	O-L	L-O	O-L	L-O	O-L	L-O	O-L	L-O	O-L	L-O	O-L	L-O	O-L	L-O	O-L					
CF $\alpha$ +	3,81	22,6	23,1	1,27	21,6	22,4	-1,0	-0,7	1,91	22,2	23,0	-0,4	-0,1	5,72	22,8	23,4	0,2	0,3	7,62	23,0	23,5	0,4	0,4
CF $\alpha$ -	4,65			9,30					6,98					2,33					1,55				
CF $\beta$ +	-1,67	22,6	23,1	-0,56	23,3	23,9	0,7	0,8	-0,84	23,2	23,9	0,6	0,8	-2,51	21,0	21,3	-1,6	-1,8	-3,34	19,2	17,4	-3,4	-5,7
CF $\beta$ -	1,08			0,36					0,54					1,62					2,16				
CF $\gamma$ +	-0,89	22,6	23,1	-0,30	20,8	20,9	-1,8	-2,2	-0,45	21,6	22,3	-1,0	-0,8	-1,34	23,0	23,8	0,4	0,7	-1,78	23,2	24,3	0,6	1,2
CF $\gamma$ -	1,65			0,55					0,83					2,48					3,30				
CF $\theta$ +	1,00	22,6	23,1	0,33	22,5	23,2	-0,1	0,1	0,50	22,6	23,0	0,0	-0,1	1,50	22,8	23,4	0,2	0,3	2,00	22,7	23,5	0,1	0,4
CF $\theta$ -	1,00			2,00					1,50					0,50					0,33				

**Tabela 4: Resultados da análise de sensibilidade dos parâmetros gerais de *driver behavior***

Parâmetro	Análise de Sensibilidade individual (1 por vez) - Parâmetros gerais de <i>Drive Behavior</i>																						
	Default		Nível 1				Nível 2				Nível 3				Nível 4								
	Valor	Velocidade média		Valor	Velocidade média		Diferença V.M.		Valor	Velocidade média		Diferença V.M.		Valor	Velocidade média		Diferença V.M.						
	L-O	O-L	L-O	O-L	L-O	O-L	L-O	O-L	L-O	O-L	L-O	O-L	L-O	O-L	L-O	O-L	L-O	O-L					
Headway	0,051	22,6	23,1	0,50	22,2	22,7	-0,4	-0,4	0,75	21,9	22,3	-0,7	-0,8	1,00	21,5	22,0	-1,1	-1,1	1,25	21,3	20,9	-1,3	-2,2
Headway Thresholds (Lower)	0,330			0,20					0,44					0,55					0,66				
Headway Thresholds (Upper)	3,469	22,6	23,1	2,08	22,7	23,3	0,1	0,2	4,61	22,5	23,1	-0,1	0,0	5,79	22,4	22,8	-0,2	-0,3	6,94	22,4	22,7	-0,2	-0,4

**Tabela 5:** Resultados da análise de sensibilidade dos parâmetros de *lane-changing* (LC)

Parâmetro	Análise de Sensibilidade individual (1 por vez) - Parâmetros gerais de <i>Lane-changing</i>																						
	Default		Nível 1				Nível 2				Nível 3				Nível 4								
	Valor	Velocidade média		Valor	Velocidade média		Diferença V.M.		Valor	Velocidade média		Diferença V.M.		Valor	Velocidade média		Diferença V.M.						
		L-O	O-L		L-O	O-L	L-O	O-L		L-O	O-L	L-O	O-L		L-O	O-L	L-O	O-L	L-O	O-L			
LC Path Influence Factor	-0,1826	22,6	23,1	-0,0609	22,7	23,3	0,1	0,2	-0,0913	22,7	23,2	0,1	0,1	-0,2739	22,6	23,4	0,0	0,3	-0,3652	22,6	23,1	0,0	0,0
LC Minimum Speed Gain	0,0790	22,6	23,1	0,0263	22,7	23,1	0,1	0,0	0,0395	22,8	23,1	0,2	0,0	0,1185	22,7	23,2	0,1	0,1	0,1580	22,7	23,2	0,1	0,1
LC Average Speed Gain	0,1668	22,6	23,1	0,0556	22,5	23,1	-0,1	0,0	0,0834	22,5	22,9	-0,1	-0,2	0,2502	22,6	23,3	0,0	0,2	0,3336	22,6	23,8	0,0	0,7
LC Heavy Vehicle Ahead	-1,6678	22,6	23,1	-0,5559	22,7	23,0	0,1	-0,1	-0,8339	22,6	23,2	0,0	0,1	-2,5017	22,6	23,1	0,0	0,0	-3,3356	22,4	23,2	-0,2	0,1
LC Lane not Connected	-3,6775	22,6	23,1	-1,2257	22,6	23,1	0,0	0,0	-1,8388	22,6	23,1	0,0	0,0	-5,5163	22,6	23,1	0,0	0,0	-7,3550	22,6	23,1	0,0	0,0
LC Same Dir. as Previous DLC	1,0708	22,6	23,1	0,3569	22,6	23,0	0,0	-0,1	0,5354	22,6	23,0	0,0	-0,1	1,6062	22,6	23,1	0,0	0,0	2,1416	22,6	23,1	0,0	0,0
MLC Critical Distance	283	22,6	23,1	100	22,5	23,3	-0,1	0,2	200	22,5	23,4	-0,1	0,3	400	22,7	23,4	0,1	0,3	500	22,7	23,3	0,1	0,2

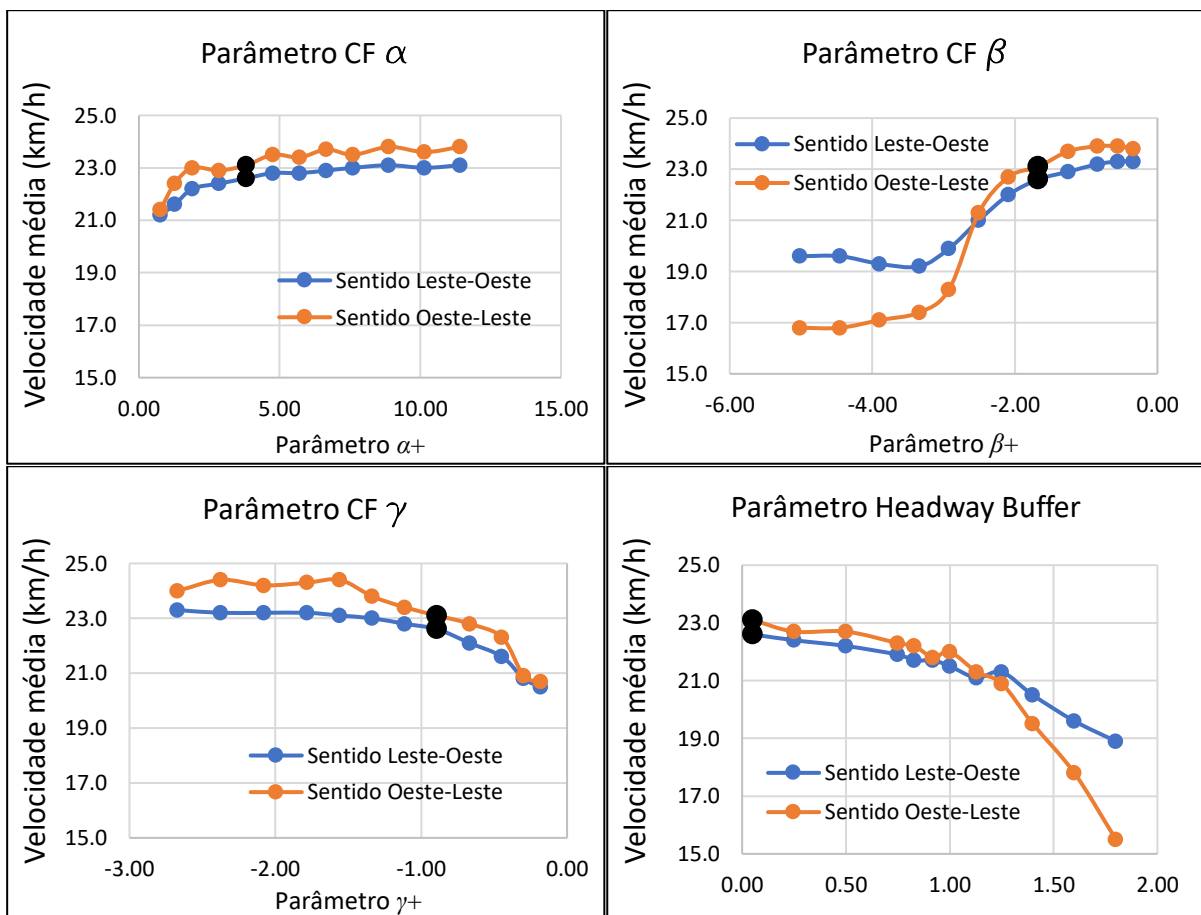
**Tabela 6:** Resultados da análise de sensibilidade dos parâmetros de *gap-acceptance for lane-changing* (GALC)

Parâmetro	Análise de Sensibilidade individual (1 por vez) - Parâmetros de Gap Acceptance																						
	Default		Nível 1				Nível 2				Nível 3				Nível 4								
	Valor	Velocidade média		Valor	Velocidade média		Diferença V.M.		Valor	Velocidade média		Diferença V.M.		Valor	Velocidade média		Diferença V.M.						
		L-O	O-L		L-O	O-L	L-O	O-L		L-O	O-L	L-O	O-L		L-O	O-L	L-O	O-L	L-O	O-L			
GALC Minimum DLC Lead	1,50		0,75					1,13					2,25				3,00						
GALC Minimum DLC Lag	2,16		1,08					1,62					3,24				4,32						
GALC Minimum MLC Lead	0,85	22,6	23,1		22,7	23,1	0,1	0,0		22,7	23,2	0,1	0,1		22,6	23,1	0,0	0,0		22,5	22,8	-0,1	-0,3
GALC Minimum MLC Lag	1,45		0,73					1,09					2,18				2,90						
GALC Alpha DLC Lead	-0,008		-0,003					-0,004					-0,012				-0,016						
GALC Alpha DLC Lag	-0,196	22,6	23,1		22,5	23,4	-0,1	0,3		22,6	23,1	0,0	0,0		22,6	23,4	0,0	0,3		22,8	23,2	0,2	0,1
GALC Alpha MLC Lead	-0,005		-0,002					-0,003					-0,008				-0,010						
GALC Alpha MLC Lag	-0,178		-0,059					-0,089					-0,267				-0,356						

No trabalho da California PATH (2012), os parâmetros adotados para a modelagem do corredor interestadual I-805 da Califórnia foram o *critical headway*, *look-ahead distance* (*lane-changing*), *speed thresholds for yielding* e outros parâmetros dos modelos *gap-acceptance* e de escolha de rotas, cuja maioria não foi citada ou não foi utilizada em nossa análise devido ao baixo potencial de influência sobre a velocidade média do corredor e/ou à ausência de dados necessários como no caso da escolha de rotas. Já no caso do estudo de Jiménez *et al.* (2016), os parâmetros cuja influência sobre o fluxo veicular foi significativa foram o  $\alpha$ ,  $\gamma$ , *headway thresholds*, *headway buffer*, *minimum/average speed gain*, *critical headway* e *gap between stopped vehicles* (coletável em campo), que, apesar do estudo de caso ter sido uma rotatória localizada sob um viaduto e a medida de desempenho considerada ter sido outra (fluxo veicular), incluíram aqueles identificados como impactantes no desempenho do tráfego da Av. Pontes Vieira, exceto o parâmetro  $\beta$ , que nem foi considerado na análise dos autores. A

ANOVA foi realizada apenas com 12 parâmetros pré-selecionados: aqueles que foram calibrados em outros estudos de referência e alguns outros com potencial teórico de impacto.

A fim de investigar melhor o impacto dos parâmetros calibráveis identificados como mais relevantes, foi realizada outra análise mais refinada considerando mais níveis de valores dos parâmetros, a partir da qual foram obtidas as curvas com a variação da velocidade média (por sentido de tráfego) em função do valor do parâmetro, apresentadas na Figura 3. No caso dos parâmetros  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  do modelo de *car-following*, os valores no eixo horizontal correspondem ao regime de aceleração ( $\alpha+$ ,  $\beta+$  e  $\gamma+$ ), porém variou-se também em cada nível o valor associado ao regime de desaceleração aplicando-se o mesmo fator de proporção em relação ao valor *default*. Vale ressaltar ainda que os marcadores de cor preta e de maior tamanho correspondem aos valores *default*.



**Figura 3:** Curvas de velocidade média por sentido em função dos parâmetros mais relevantes

Como pode ser observado novamente, os parâmetros  $\beta$  e  $\gamma$  do modelo de *car-following* e o *headway buffer* foram os que apresentaram maior influência isolada sobre a medida de desempenho do tráfego do corredor da Av. Pontes Vieira, com diferenças absolutas máximas da ordem de 2 a 8 km/h em relação ao cenário *default*. A velocidade média correspondente aos maiores valores de *headway buffer* apresentou uma forte tendência de decréscimo, porém esses valores são bem maiores do que o valor médio *default* do parâmetro.

Nota-se também que para perfis mais agressivos dos condutores (pontos das curvas associados às velocidades mais altas) há uma tendência de estabilização na estimativa da velocidade média, possivelmente porque mesmo aumentando a agressividade dos usuários (talvez até mesmo representando um comportamento médio irreal) não há mais como o desempenho da corrente de tráfego ficar melhor porque os veículos já se encontram muito próximos uns dos outros.

## 8. CONCLUSÕES

Neste trabalho propôs-se a realização de uma filtragem dos parâmetros mais relevantes para a modelagem da velocidade média de uma via arterial. Como estudo de caso, utilizou-se um corredor arterial da cidade de Fortaleza. A princípio, foram escolhidos parâmetros classificados em performance e classificação veicular, parâmetros gerais de comportamento do motorista e parâmetros dos modelos comportamentais. Todos os parâmetros escolhidos de performance e classificação veicular e os parâmetros gerais (espaçamento entre veículos parados, velocidade desejada e parâmetros do transporte público) foram classificados como possíveis de serem obtidos em campo. Os parâmetros restantes, pela dificuldade ou impossibilidade de se observar em campo, foram classificados em possíveis calibráveis.

Em seguida, foram elaboradas duas análises de sensibilidade: a primeira com apenas quatro níveis de variação dos valores dos parâmetros e a segunda com maior quantidade de níveis e, portanto, mais refinada. A primeira análise de sensibilidade permitiu estabelecer que os parâmetros calibráveis do TransModeler mais relevantes, considerando a influência na medida de desempenho velocidade média de um corredor arterial, são os parâmetros do *car-following* ( $\alpha+$  e  $\alpha-$ ;  $\beta+$  e  $\beta-$ ;  $\gamma+$  e  $\gamma-$ ) e o parâmetro geral de comportamento do motorista *headway buffer*, que são semelhantes aos identificados no estudo de Jiménez *et al.* (2016). Esses parâmetros alteraram, nos níveis aplicados, a velocidade média em até 1,0 a 5,7 km/h. Na segunda análise de sensibilidade, onde foram escolhidos os parâmetros identificados com maior influência, foi constatado que o  $\beta$ ,  $\gamma$  e *headway buffer* possuem maior impacto, com diferenças absolutas em até 2 a 8 km/h na velocidade média do corredor.

Algumas limitações podem ser apontadas para este estudo. Uma delas é que foi tratada apenas a diferença absoluta entre as velocidades médias obtidas nas cinco simulações como critério para definir a influência dos parâmetros, podendo ser utilizado um intervalo de confiança; porém, seria necessário um tempo bem maior para as simulações e obtenção dos resultados. Outra limitação importante é a ausência de análise da interdependência entre os parâmetros, como entre os parâmetros referentes à tomada de decisão em mudar de faixa (*lane-changing*) e os parâmetros referentes à aceitação de brechas (*gap-acceptance*) durante a mudança de faixa, além da interdependência entre os parâmetros do mesmo modelo. Partindo das análises realizadas neste estudo, pretende-se avançar nessas limitações em estudos posteriores.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Barceló, J. (2010) *Fundamentals Traffic Simulations. International Series in Operations Research & Management Science*. v.145. Ed. Springer, New York.
- Barceló, J. e J. Casas (2004) Methodological Notes on the Calibration and Validation of Microscopic Traffic Simulation Models. *In: Transportation Research Board 83<sup>rd</sup> Annual Meeting, Washington, USA.*
- Bessa-Júnior, J. E.; A. L. Medeiros; A. M. Araújo; J. Q. Sousa; V. Magalhães e W. S. Oliveira (2017) Calibração e Validação do Simulador TransModeler para Modelagem de Corredores Viários em Cidades de Grande Porte. *Anais do XXXI Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, Recife.*
- California PATH (2012) *Evaluation of Traffic Simulation Model Use in the Development of Corridor System Management Plans (CSMPs)*. Relatório de pesquisa, Institute of Transportation Studies e University of California, USA.

- Caliper Corporation (2014) *TransModeler 4.0 User's Guide*. Newton, USA.
- Dowling, R.; A. Skabardonis; J. Halkias; G. McHale e G. Zammit (2004) Guidelines for Calibration of Microsimulation Models. *Transportation Research Record*, v. 1876, p. 1-9.
- Elefteriadou, L. (2014) *An Introduction to Traffic Flow Theory*. Ed. Springer, New York.
- Hollander, Y. e R. Liu (2008) The Principles of Calibrating Traffic Microsimulation Models. *Transportation*, v. 35, n. 3, p. 347–362.
- Jiménez, D.; F. Muñoz; S. Arias e J. Hincapie (2016) Software for Calibration of Transmodeler Traffic Microsimulation Models. *In: IEEE 19<sup>th</sup> International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, Rio de Janeiro, Brasil.
- Lacerda, V. M. (2016) *Estimação da Velocidade Média em Vias Urbanas com Uso do Microsimulador VISSIM*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE.
- Medeiros, A. L. (2012) *Aplicabilidade de Algoritmos Genéticos para Calibração de Redes Viárias Urbanas Microsimuladas*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE.
- Spiegelman, C. H.; E. S. Park e L. R. Rilett (2011) *Transportation Statistics and Microsimulation*. Ed. Chapman & Hall/CRC, Boca Raton, Florida.
- TRB (2010) *Highway Capacity Manual*. Transportation Research Board, v. 3, Washington.

---

MSc. Alessandro Macêdo de Araújo (alessandro.mac.araujo@gmail.com)  
MSc. André Luis Medeiros (andremed\_1@yahoo.com.br)  
MSc. Janailson Queiroz Sousa (janailsonqs@gmail.com)  
Eng. Roberto Matheus Nunes Torquato (roberto.mtorquato@gmail.com)  
Transitar Engenharia e Consultoria Ltda.  
Av. Humberto Monte, nº 2929, sala 519s, Pici, Fortaleza, CE, 60.440-593.