

ANÁLISE COMPARATIVA DAS SIMULAÇÕES MESOSCÓPICA E MICROSCÓPICA DO VISSIM NA MODELAGEM DO TRÁFEGO DE VIAS URBANAS

Alessandro Macêdo de Araújo
Diego Barbosa Fontes
Matheus Fontenelle Siqueira
Manoel Mendonça de Castro Neto

Universidade Federal do Ceará
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes - PETRAN

RESUMO

A modelagem mesoscópica tem sido implementada nos principais simuladores de tráfego nos últimos anos, devido à sua simplicidade e rapidez computacional. O principal objetivo deste trabalho foi comparar as simulações mesoscópica e microscópica do software VISSIM na modelagem do tráfego de vias urbanas. A comparação foi baseada na discussão conceitual dos modelos e nos resultados da modelagem de uma via arterial urbana localizada em Fortaleza. Os resultados mostram que em interseções semaforizadas as abordagens apresentaram estimativas de atraso e de velocidade média, em geral, similares. Porém, nas aproximações transversais de interseções não semaforizadas, o modelo mesoscópico superestimou o atraso médio consideravelmente. Com relação à variabilidade dos resultados, ambos os modelos geraram estimativas de velocidade média e de atraso com desvios padrões semelhantes. Quanto à eficiência computacional, a simulação da rede meso foi aproximadamente quatro vezes mais rápida do que a simulação da rede micro.

ABSTRACT

Mesoscopic modeling has been implemented in major traffic simulators in recent years due to its simplicity and computational speed. The main objective of this study was to compare the mesoscopic and microscopic simulations of VISSIM for modeling traffic on urban streets. The comparison was based on the conceptual discussion of the models and on the results of the modeling of an urban arterial located in Fortaleza. The results show that, in general, both approaches presented similar estimates of delay and average speed for signalized intersections. However, in stop-controlled links, the mesoscopic model overestimated average delay considerably. Regarding the variability of the results, both models generated estimates of mean speed and delay with similar standard deviations. As for the computational efficiency, the simulation of the meso network was approximately four times faster than the simulation of the micro network.

1. INTRODUÇÃO

Os modelos de simulação de tráfego são classificados em três grandes grupos: macroscópico, mesoscópico e microscópico. Nos modelos microscópicos, cada veículo reage a outros veículos, individualmente, enquanto nos modelos mesoscópicos os veículos reagem às impedâncias, representadas por variáveis agregadas do fluxo de tráfego, como atraso e tamanho de fila. As principais vantagens dos modelos mesoscópicos quando comparados aos modelos microscópicos são a menor exigência de esforços de calibração e a maior eficácia computacional (Ehlert *et al.*, 2017; PTV, 2018). Por outro lado, a abordagem microscópica oferece uma modelagem mais detalhada.

Apesar de na literatura serem mencionadas recorrentemente as potencialidades e as limitações das duas abordagens, até o momento da submissão deste trabalho foi encontrado apenas um estudo que comparou, conceitualmente, as duas formas de modelagem, Ehlert *et al.* (2017), que realizaram também uma comparação entre o modelo mesoscópico do VISSIM e o modelo do *Highway Capacity Manual* (HCM) (TRB, 2010) de estimativa da capacidade potencial para uma interseção não semaforizada. Portanto, o principal objetivo deste trabalho é realizar uma análise comparativa entre as simulações mesoscópica e microscópica do software de simulação VISSIM para a modelagem do tráfego veicular de vias urbanas.

Este artigo está organizado em quatro seções, além da Introdução. Na Seção 2 há uma discussão conceitual sobre os modelos mesoscópicos do VISSIM, sendo comparados com os modelos microscópicos do software. Na Seção 3 é apresentada a área de estudo, a coleta de dados e o método utilizado na calibração das redes micro e mesoscópica de uma via arterial de Fortaleza. Na Seção 4 são mostrados os principais resultados comparativos entre as duas modelagens, e, por fim, na Seção 5 têm-se as conclusões e recomendações para futuros trabalhos.

2. SIMULAÇÃO MESOSCÓPICA DO VISSIM

Atualmente, os principais simuladores de tráfego existentes no mercado realizam modelagem mesoscópica. Em alguns a simulação é do tipo *time-based*, como no TransModeler (Caliper, 2018), em que cada passo da simulação é realizado a cada intervalo de tempo fixo. Em outros, ela é do tipo *event-based*, como no Aimsun (TSS, 2013) e no VISSIM, em que cada passo é dado apenas quando um evento ocorre, como: (i) entrada de veículos na rede; (ii) mudança no estado dos grupos semaforicos; (iii) entrada de veículos em um nó; e (iv) entrada e saída de veículos em áreas microssimuladas. O último tipo de evento mencionado ocorre em simulações híbridas, na qual parte da rede é simulada microscopicamente. Porém, a simulação híbrida não é objeto do presente estudo.

Na abordagem mesoscópica do VISSIM, os veículos são modelados individualmente, porém baseando-se em modelos simplificados de *car-following*, *lane changing* e *gap acceptance*. Por isso, a melhor performance computacional dos modelos mesoscópicos se deve não só ao menor número de passos, já que é baseada em eventos, mas também à formulação simplificada dos modelos comportamentais. A seguir esses modelos são discutidos e comparados conceitualmente com os modelos comportamentais microscópicos.

2.1 Car-following

O modelo microscópico de *car-following* do VISSIM para vias urbanas, Wiedemann-74 (W74), possui três parâmetros: o ax , que é o espaçamento médio entre veículos quando estão parados, e os componentes aditivo bx_add e multiplicativo bx_mult que aumentam o espaçamento com o aumento da velocidade. Há ainda nove parâmetros de *car-following* do VISSIM que não pertencem ao modelo de Wiedemann: quatro deles relativos à distância mínima e máxima que o motorista é capaz de observar à frente, atrás, ou ao seu lado; dois que representam o número de veículos e de objetos considerados nas decisões de reação; dois associados à duração e à probabilidade de ocorrência de distração do motorista; e um de distância a objetos fixos quando parado, como semáforos.

O modelo mesoscópico de *car-following* do VISSIM, baseado em Mahut (2001), tem como principal diferença a simplificação de não modelar a aceleração. As mudanças de velocidade dos veículos ocorrem instantaneamente e o veículo pode se encontrar em apenas um de dois estados: viajando em velocidade desejada ou em *following*, mantendo um *headway* constante. Os parâmetros comportamentais do modelo meso de *car-following* são:

- *Meso standstill distance*, que representa o espaçamento médio entre os veículos quando parados em fila, análogo ao parâmetro “ ax ” do modelo microscópico W74;
- *Tempo de reação*, que implica em um acréscimo no espaçamento entre os veículos quando estão em *following*, portanto possui função análoga a dos parâmetros bx_add e bx_mult do modelo microscópico.

O modelo mesoscópico de *car-following* do VISSIM determina a posição do veículo [$x_{\text{seguidor}}(t)$] como função da sua velocidade (V_{seguidor}) e da posição do veículo líder [$x_{\text{líder}}(t)$], como descrito na Equação 1:

$$x_{\text{seguidor}}(t) = \min [x_{\text{seguidor}}(t - \varepsilon) + \varepsilon \cdot V_{\text{seguidor}} ; x_{\text{líder}}(t - R) - L_{\text{líder}}] \quad (1)$$

em que ε : incremento de tempo;

R: tempo de reação dos condutores;

$L_{\text{líder}}$: comprimento efetivo do veículo líder, que corresponde ao comprimento desse veículo somado à *meso standstill distance*.

Portanto, a posição do veículo é o valor mínimo de dois argumentos. O primeiro se refere ao fluxo livre, no qual a sua posição no tempo “t” depende apenas da sua posição no instante anterior (tempo “t - ε ”) e da sua velocidade desejada, que é um parâmetro a ser definido, assim como no modelo microscópico. O segundo caso ocorre quando o veículo está em *following*, quando a sua posição é a posição do veículo líder descontado o seu comprimento efetivo, mantendo assim um espaçamento referente ao tempo de reação “R”.

Duas formulações são possíveis para os modelos meso de *car-following* no VISSIM, a depender do tipo de *meso speed model* atribuído a cada *link*: com base no *link* (*link-based*) ou com base nos veículos (*vehicle-based*). A opção baseada no *link* adota a mesma velocidade desejada para todos os veículos do *link*, portanto é mais rápida computacionalmente. Na opção baseada nos veículos, cada veículo tem sua própria velocidade desejada, proveniente de uma distribuição de probabilidade, assim como ocorre na modelagem microscópica.

A escolha do *meso speed model* baseado no veículo pode introduzir um acréscimo de atraso veicular decorrente da diferença de velocidades entre os condutores. Uma importante implicação da escolha do modelo baseado no *link* é que, como as velocidades de todos os veículos no *link* são iguais, algumas funcionalidades são perdidas, como: pontos de decisão de velocidade desejada (*desired speed decision*, que podem ser inseridos em determinadas seções do *link*); as áreas de redução de velocidade (*reduced speed areas*) e a distinção de velocidade desejada entre veículos de classes diferentes.

Como o *headway* mínimo de *following* é $R + L_{\text{líder}}/V_{\text{seguidor}}$, o tempo de reação é o principal fator que afeta o fluxo de saturação, já que o comprimento veicular e o *meso standstill distance* encontram-se divididos pela velocidade desejada. A variação de 1 metro no comprimento efetivo do veículo, mesmo para uma velocidade desejada de apenas 10 m/s (36 km/h), corresponde a uma variação de apenas 0,1 s no *headway* mínimo de *following*. Ciuffo *et al.* (2013) conduziram uma análise de sensibilidade dos parâmetros de *car-following* do modelo mesoscópico do Aimsun, que são similares aos do VISSIM, e os resultados obtidos indicaram que o parâmetro *tempo de reação* foi o que mais afetou as medidas de desempenho do tráfego das interseções semaforizadas.

Outro ponto importante sobre o modelo mesoscópico de *car-following* refere-se à simulação do tráfego de interseções não semaforizadas. Como os *headways* de *following* na via principal são constantes, o processo de aceitação de brechas pode se tornar bastante irrealista, comprometendo a qualidade da modelagem do tráfego das aproximações secundárias dessas interseções.

2.2 Mudança de faixa

A mudança de faixa, seja obrigatória ou facultativa, geralmente é modelado como uma sequência de quatro etapas: a decisão de mudar de faixa, seguida da escolha da faixa desejada, da avaliação das brechas e do ajuste na velocidade que possibilite a mudança. Enquanto no modelo microscópico as mudanças de faixa podem ser realizadas ao longo de toda a via, na abordagem mesoscópica do VISSIM elas ocorrem apenas na entrada do *link*. No caso de haver diversas faixas que permitam o prosseguimento à rota desejada, escolhe-se a faixa com menor densidade. Portanto, espera-se que no modelo mesoscópico haja menos impedâncias decorrentes de mudanças de faixa ao longo dos *links* e mais impedâncias devido ao *following*. Assim, em vias servidas por transporte público, essa simplificação implica, por exemplo, na impossibilidade de os veículos ultrapassarem os ônibus nos pontos de parada, o que pode ocasionar uma superestimação do atraso veicular.

2.3 Aceitação de brechas

Na modelagem mesoscópica do VISSIM, o controle de tráfego em situações de conflitos de fluxos só pode ser modelado por meio de *conflict areas*. Para a modelagem de interseções não semaforizadas existem três parâmetros essenciais:

- *Meso critical gap*, que define a brecha mínima aceita pelos veículos da aproximação secundária, sendo a brecha o tempo entre a traseira do veículo líder e o da dianteira do veículo seguidor. Portanto, esse parâmetro tem o mesmo conceito do parâmetro *minimum gap time* do modelo microscópico;
- *Meso follow-up gap*, que consiste no intervalo de tempo entre a partida de dois veículos consecutivos da aproximação secundária, portanto define a capacidade de uma aproximação secundária quando não há fluxo de tráfego na via principal (Ehlert *et al.*, 2017). Esse parâmetro não está presente na simulação microscópica do VISSIM, portanto a capacidade em situação de pouca demanda de tráfego na principal é definida pelo tempo de reação e perfil de aceleração;
- *Maximum waiting time*, que define o tempo máximo de espera de um veículo da aproximação secundária antes que ele force a sua passagem na via principal, portanto determina a capacidade da aproximação secundária em casos de elevado fluxo veicular na via principal (Ehlert *et al.*, 2017). Esse parâmetro também não existe na modelagem microscópica do VISSIM, porém existem outras formas de se evitar a capacidade nula, como o parâmetro *maximum speed*, que é o limite de velocidade acima da qual os veículos da via principal não são considerados na avaliação do *headway* de espaço, que pode ser utilizado para representar um comportamento mais agressivo dos motoristas da aproximação secundária em se inserir no cruzamento sob condições de congestionamento na via principal. Outra forma é a construção de *yellow box* por meio de *conflict areas*.

A análise de sensibilidade feita por Ciuffo *et al.* (2013) também englobou os parâmetros de *gap acceptance* do modelo mesoscópico do simulador Aimsun, que também são similares aos do VISSIM. O parâmetro do Aimsun análogo ao *maximum waiting time* do VISSIM exerceu influência significativa no desempenho do tráfego de interseções não semaforizadas, como esperado, mas ainda assim o *reaction time* foi predominante.

2.4 Outras diferenças importantes entre as duas abordagens

De acordo com a PTV (2018), diversas das funcionalidades disponíveis para a simulação microscópica não podem ser utilizadas na modelagem mesoscópica. Algumas das principais implicações para a modelagem de vias urbanas são:

- As simulações mesoscópicas no VISSIM estão atreladas à realização de alocações dinâmicas de tráfego (*Dynamic Traffic Assignment – DTA*, em inglês). Assim, não é possível inserir a demanda veicular a partir de fluxos nas interseções nem por meio de fluxos nos *links* de entrada na rede com rotas pré-estabelecidas, e sim necessariamente por matrizes origem-destino (O-D), o que implica na inserção de *parking lots* e *meso nodes*;
- Pedestres e ciclistas não são considerados na modelagem;
- Controle de tráfego por meio de *priority rules*, sinalização de parada obrigatória (“Pare”) e controles de tráfego atuados não são passíveis de utilização;
- O transporte público no modelo mesoscópico realiza o percurso somente até o último ponto de parada, mas não até o final da linha (saída do veículo da rede);
- Não é possível realizar a coleta de variáveis individuais dos veículos; as medidas de desempenho são agregadas por *link/edge*, faixa de tráfego ou nó, como densidade, velocidade média, atraso relativo ou atraso médio por movimento de conversão nas interseções.

3. MODELAGEM DAS REDES MICRO E MESO

3.1 Área de estudo e coleta dos dados

Para analisar comparativamente a performance dos modelos mesoscópicos frente à modelagem microscópica, escolheu-se como área de estudo uma importante via arterial da cidade de Fortaleza, um trecho de 1,2 km de extensão da Av. Santos Dumont. Essa via, utilizada inicialmente no trabalho de Lacerda (2016), possui duas faixas de tráfego misto, composta por nove interseções em nível, sendo cinco delas semaforizadas, conforme Figura 1. A via foi subdividida em dois trechos para aumentar o grau de detalhamento da análise. O corredor possui quatro paradas de ônibus e dez linhas de transporte público com fluxo médio de 42 ônibus/hora no horário considerado.



Figura 1: Área de estudo adotada. Fonte: Adaptada de Lacerda, 2016.

Para quantificar a demanda foram realizadas contagens veiculares direcionais em todas as interseções do corredor no período da manhã (06h às 09h) de uma quarta-feira, 30 de abril de 2014, sendo a hora de pico identificada de 07h às 08h. O fluxo veicular observado no pico da manhã foi da ordem de 1.000 a 1.100 veíc/h nas aproximações das interseções do trecho 1 e de 900 a 1.000 veíc/h no trecho 2. Foram realizadas contagens classificatórias por meio de câmeras posicionadas ao longo da via, obtendo-se uma proporção de veículos pesados de

aproximadamente 2,5%. Os dados das programações semaforicas foram obtidos junto ao Controle de Tráfego em Área de Fortaleza – CTAFOR.

Para obtenção das velocidades foram coletados tempos de viagem com o uso de veículos-teste no horário entre 07h e 08h, sendo 14 observações nesse período modelado. O fluxo de saturação foi coletado em uma aproximação da via principal de acordo com o método 1 do Manual do DENATRAN (2014), para 15 ciclos semaforicos. Visando estimar o espaçamento médio dos veículos parados em fila (*ax* e *meso standstill distance*), foram realizadas filmagens aéreas por meio de drone e com auxílio de mini-cones espaçados a cada metro para estabelecer a escala da imagem, sendo coletadas 54 observações. Quanto ao transporte público, os dados de tempo em serviço dos ônibus nas paradas foram obtidos por meio de filmagens em 4 pontos de ônibus de uma avenida similar, com média de aproximadamente 10 segundos. Embora os tempos dos ônibus nas paradas da via similar possam ser diferentes dos tempos nas paradas da via em estudo, ressalta-se que o presente trabalho é de caráter comparativo, portanto não há necessidade de se representar tais tempos com acurácia. Na Tabela 1 é apresentado um resumo dos dados coletados, incluindo a quantidade de observações e o intervalo de 95% de grau de confiança (IC) para a média.

Tabela 1: Dados coletados em campo

Variável	N (observações)	Média (IC de 95%)
Distância média entre veículos parados	54	2,2 ± 0,2 m
Tempo de viagem	14	111 ± 15 s (trecho 1) 127 ± 14 s (trecho 2)
Velocidade média no espaço	14	15,7 ± 2,3 km/h (trecho 1) 14,1 ± 1,6 km/h (trecho 2)
Fluxo de saturação	15 (ciclos)	1476 ± 72 veíc/h

3.2 Calibração da rede microscópica

A calibração do modelo W74 feita por Lacerda (2016) consistiu basicamente na coleta do parâmetro *ax* e no ajuste dos parâmetros *bx_add* e *bx_mult* com base na medida-alvo fluxo de saturação da aproximação da via principal da interseção com a Rua João Cordeiro, resultando no valor 5,0 para ambos os parâmetros. Para essa calibração foram retiradas as paradas de ônibus e os semáforos localizados a jusante da interseção com a Rua João Cordeiro, para que fosse obtido o fluxo de saturação na simulação sem essas interferências. Foram utilizadas as distribuições de velocidade desejada *default* no software, sendo alocada uma distribuição de 40 km/h para os ônibus e caminhões – com limites entre 40 e 45 km/h – e de 50 km/h para os veículos leves – com limites entre 48 e 58 km/h, condizentes com valores coletados em vias similares de Fortaleza. A validação, utilizando 30 replicações, resultou nas velocidades médias de 15,0 ± 0,6 km/h no trecho 1 e 16,0 ± 0,6 km/h no trecho 2, correspondendo a erros de 6,3% e 3,2%. Antes da calibração do *car-following*, esses erros eram de 31% e 26%. Portanto, é interessante notar que somente a calibração dos parâmetros de *car-following* já foi capaz de reduzir bastante os erros de estimativa das velocidades nos trechos.

3.3 Calibração da rede mesoscópica

Para realizar a simulação mesoscópica são necessárias algumas alterações na codificação da rede utilizada para a modelagem microscópica. A primeira é a adição de *parking lots* para

representar os pontos de origem e de destino na rede, cujos fluxos são especificados por meio de matriz O-D. A segunda diferença é que, para as interseções não semaforizadas, a modelagem mesoscópica do controle de tráfego ocorre necessariamente por meio da construção de *conflict areas*, não sendo admitido o uso de *priority rules*. Por fim, a simulação mesoscópica exige um tipo de rede especial chamada *meso graph*, composto por *meso nodes* e *meso edges*. Assim, enquanto nas redes micro é suficiente o uso de um nó por interseção (apenas nas quais se deseja obter resultados associados ao nó), nas redes mesoscópicas pode ser necessária a codificação de mais de um nó para uma interseção, sendo um nó para cada ponto de retenção de veículos.

Assim como na rede microscópica, na calibração dos parâmetros de *car-following* da rede meso foram retiradas todas as paradas de ônibus e semáforos a jusante da interseção com a Rua João Cordeiro. O parâmetro *tempo de reação* foi calibrado tendo como medida-alvo a capacidade da aproximação principal obtida da rede microscópica calibrada, resultando no valor de 1,93 s (*default* = 1,20 s), como mostrado na Figura 2. Nessa calibração utilizou-se o *standstill distance* igual a 2,2 m, coletado em campo, e o *critical gap* igual a 4,5 s, valor encontrado no trabalho de Maia (2007). Os parâmetros *follow-up gap* e *maximum waiting time* foram mantidos em *default*, pois eles influenciam basicamente o desempenho do tráfego nas aproximações secundárias das interseções não semaforizadas. A Figura 2 também mostra que o *tempo de reação* afeta a capacidade do *link* consideravelmente.

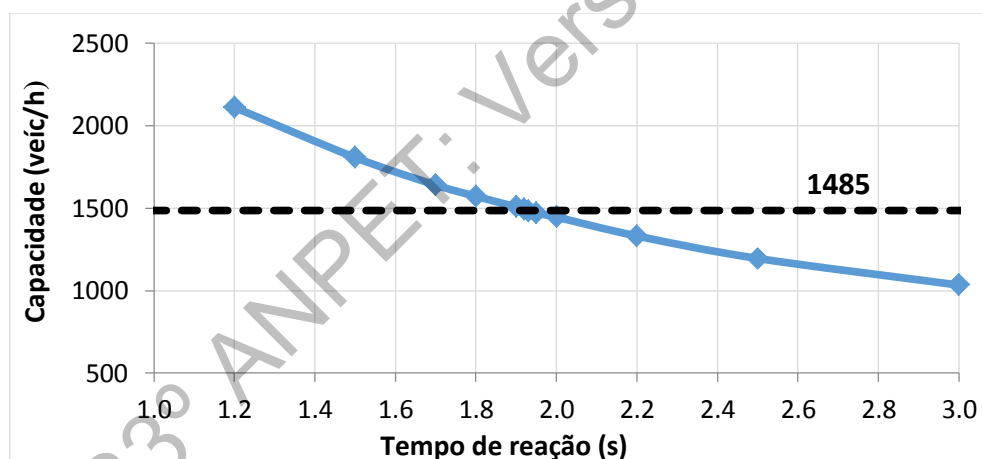


Figura 2: Calibração do parâmetro *tempo de reação*

4. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DAS REDES DE SIMULAÇÃO

Para comparar os resultados dos modelos micro e meso foram mantidas as 30 replicações com duração de 1 hora e 5 minutos de tempo de *warm-up*, já que se observou que essa quantidade de replicações, além de permitir o uso do Teorema do Limite Central para estimação intervalar da média das medidas de desempenho, foi satisfatória para que os intervalos de confiança fossem suficientemente precisos. O conjunto das 30 sementes aleatórias foi mantido o mesmo para as duas redes, embora não se esperasse pareamento entre as observações. Os resultados de velocidade média e atraso foram obtidos por trecho e por aproximação. Por fim, foi realizado um estudo de variação da demanda para analisar o comportamento dos dois modelos sob diferentes condições de tráfego. Foram necessárias aproximadamente 4 horas para simular todas as replicações da rede micro e 1 hora para a rede meso.

4.1 Análise por trechos

As velocidades médias nos trechos, antes e depois da calibração, são apresentadas na Figura 3. A linha tracejada indica o valor observado em campo. Observa-se que a calibração trouxe melhorias para ambos os modelos. Também são apresentados os intervalos de confiança de 95% para a velocidade média obtida em cada modelo. Com os modelos calibrados, no trecho 1 a diferença foi de $-0,8 \pm 0,9$ km/h, portanto não há indícios para se afirmar que a velocidade média modelada pelas duas abordagens é diferente. Em ambas, a velocidade média estimada está próxima do valor observado em campo. Já para o trecho 2, a velocidade obtida com a rede mesoscópica calibrada ficou um pouco mais próxima da observada em campo (14,1 km/h), com velocidade média de $15,0 \pm 0,5$ km/h, sendo levemente inferior à velocidade estimada pelo modelo micro – a diferença foi de $-1,0 \pm 0,7$ km/h. Porém, apesar de haver indícios de diferença estatística entre as médias da velocidade, nota-se que essa diferença é pequena.

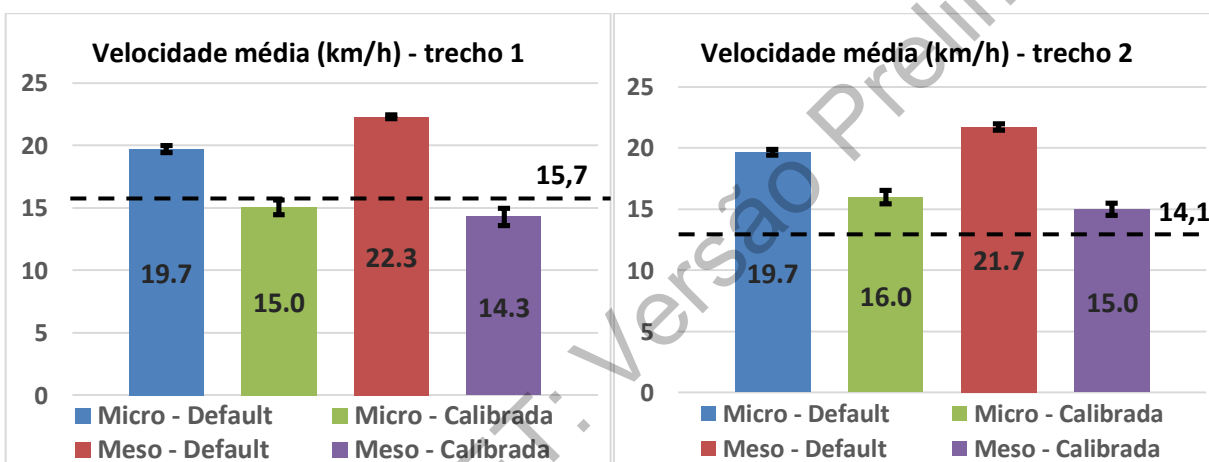


Figura 3: Velocidade média no trecho 1 e trecho 2, respectivamente

Na Figura 4 são apresentados os resultados de atraso relativo, que é definido como o atraso dividido pelo tempo de viagem. Em ambos os trechos, quando comparados os cenários calibrados, o modelo mesoscópico apresentou valores maiores de atraso, sendo o IC 95% da diferença entre as médias igual a $2,4\% \pm 1,8\%$ para o trecho 1 e $2,5\% \pm 1,5\%$ para o trecho 2, que, apesar de apresentarem indícios de significância estatística, apontam uma pequena diferença entre as duas estimativas. Isso possivelmente ocorre devido à presença de transporte público na Av. Santos Dumont e a não consideração das mudanças de faixa ao longo dos *links*, que impossibilita os veículos particulares a ultrapassarem os ônibus quando estes estão em serviço nos pontos de parada.

Com relação à variabilidade dos resultados de cada modelo calibrado, para o trecho 1 o desvio padrão das velocidades médias do modelo micro foi de 1,5 km/h e do modelo meso foi de 1,9 km/h. Para o trecho 2, os desvios padrões foram de 1,5 km/h e 1,3 km/h, respectivamente. No caso do atraso relativo, no trecho 1 o desvio padrão do modelo micro foi de 3,2% e no meso foi de 3,7%. Para o trecho 2, os desvios padrões foram de 3,1% e 2,8%, respectivamente. Foram aplicados testes-F para comparação de variâncias, com nível de significância de 5%. Em nenhum dos testes a hipótese nula de igualdade das variâncias foi rejeitada.

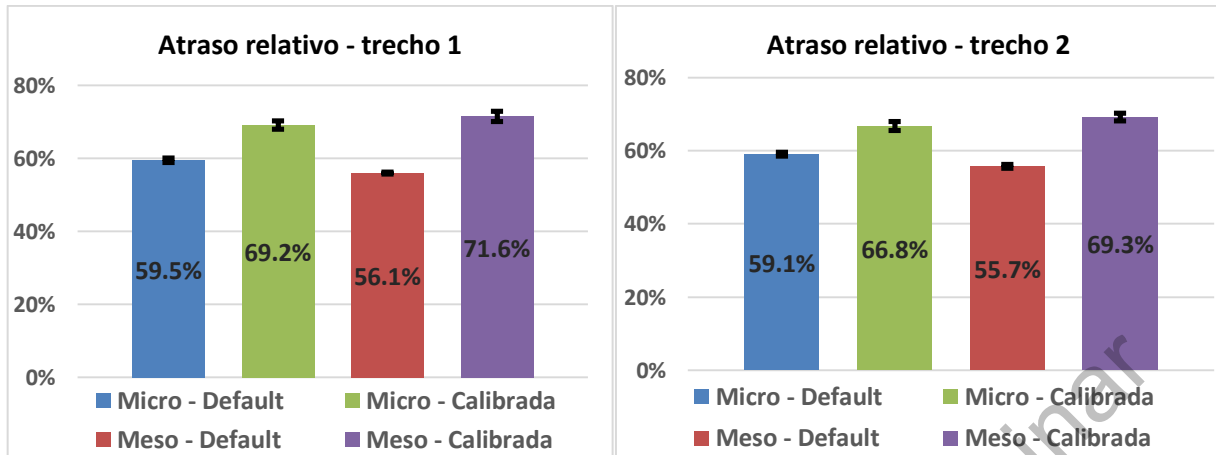


Figura 4: Atraso relativo no trecho 1 e trecho 2, respectivamente

4.2 Análise por aproximação

A análise desagregada por aproximação foi feita com base na velocidade média e no atraso médio. Com pode ser observado na Figura 5, ambos os modelos estimaram velocidades médias similares em cada aproximação do corredor em estudo, com diferença (micro-meso) máxima de $2,6 \pm 0,7$ km/h. Essa similaridade provavelmente ocorre devido à predominância do modelo de *car-following* e à semelhança dos parâmetros, sendo o espaçamento médio dos veículos em fila comum a ambas as abordagens e o *tempo de reação* possui função semelhante à da combinação do *bx_add* e *bx_mult*, que representam o aumento do espaçamento entre veículos proporcional à velocidade.



Figura 5: Mapa temático da velocidade média nos modelos microscópico e mesoscópico calibrados

Na Figura 6 é apresentado o atraso médio por movimento de conversão em cada aproximação. Comparando-se os dois modelos calibrados, percebe-se uma grande diferença na estimativa do atraso em todas as aproximações não semaforizadas, com variação de 10 a 158 segundos. Isso pode ter ocorrido devido à não-modelagem dos perfis de aceleração e desaceleração dos

veículos, o que resulta em brechas na principal mais uniformemente distribuídas. Alguns testes mostraram que a estimativa das medidas de desempenho nessas aproximações só teve ordem de grandeza semelhante à obtida pelo modelo microscópico quando os valores de *meso critical gap* e *follow-up gap* foram tão altos quanto 10 segundos, valores irrealistas para o tráfego em estudo.

No caso das aproximações semaforizadas, as diferenças (micro-meso) foram de até $11 \pm 2,3$ s, equivalente a 30%, com as maiores diferenças nas aproximações do corredor associadas aos maiores atrasos. Observa-se que, geralmente, as maiores diferenças de atraso das aproximações semaforizadas entre as duas modelagens ocorrem nos *links* da via principal, possivelmente consequência da existência dos pontos de ônibus e da restrição de mudança de faixa nos *links*, ausentes nas vias transversais.

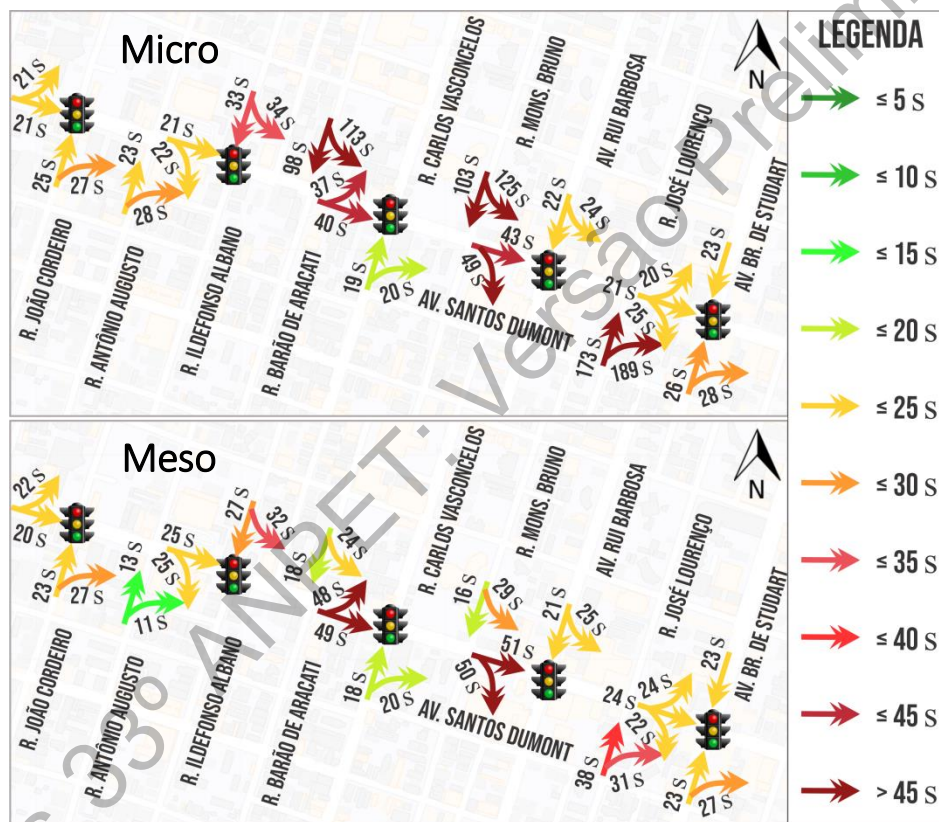


Figura 6: Atraso médio por movimento de conversão nos modelos microscópico e mesoscópico calibrados

4.3 Variação da demanda

Foi realizada, por fim, uma análise de sensibilidade em relação a variações na demanda, para analisar o comportamento dos modelos sob diferentes condições de tráfego. Inicialmente a demanda foi reduzida pela metade e depois foi incrementada de 10% em 10% até o valor de 120% do fluxo atual, situação na qual a rede já tem atingido sua saturação, com cada cenário replicado 30 vezes. Os resultados de velocidade média e atraso relativo para ambos os trechos são mostrados na Figura 7. A velocidade média nos trechos mesmo no cenário com apenas 50% da demanda foi menos que a metade da velocidade desejada inserida nos modelos (de 40 a 45 km/h para os ônibus e caminhões e de 48 a 58 km/h para os veículos leves), o que ocorre principalmente devido à existência dos semáforos e paradas de ônibus ao longo do corredor.

Em ambos os casos, as velocidades médias obtidas nos dois modelos foram semelhantes, com diferenças de até $2,3 \pm 0,3$ km/h, porém o modelo mesoscópico estimou velocidades levemente maiores para baixa demanda enquanto o inverso ocorreu para o cenário saturado. Isso possivelmente ocorre devido ao impacto da ausência de mudanças de faixa ao longo dos *links* na rede mesoscópica ser maior para condições de tráfego mais congestionadas. Outro motivo pode ser pelo fato de que o espaçamento adicional entre os veículos em regime de *following* no modelo W74 (*bx* do modelo microscópico) varia com a raiz quadrada da velocidade, enquanto o *reaction time* fixo corresponde a um aumento linear com a velocidade, de maneira que para condições mais congestionadas (menores velocidades de *following*) o modelo W74 resulta em distâncias de *following* maiores, acarretando em velocidades médias maiores, enquanto o inverso acontece para velocidades de *following* mais altas. O mesmo se refletiu nos atrasos relativos estimados, porém com diferenças ainda menos perceptíveis para menores níveis de demanda, sendo a diferença máxima igual a $3,8\% \pm 1,2\%$.

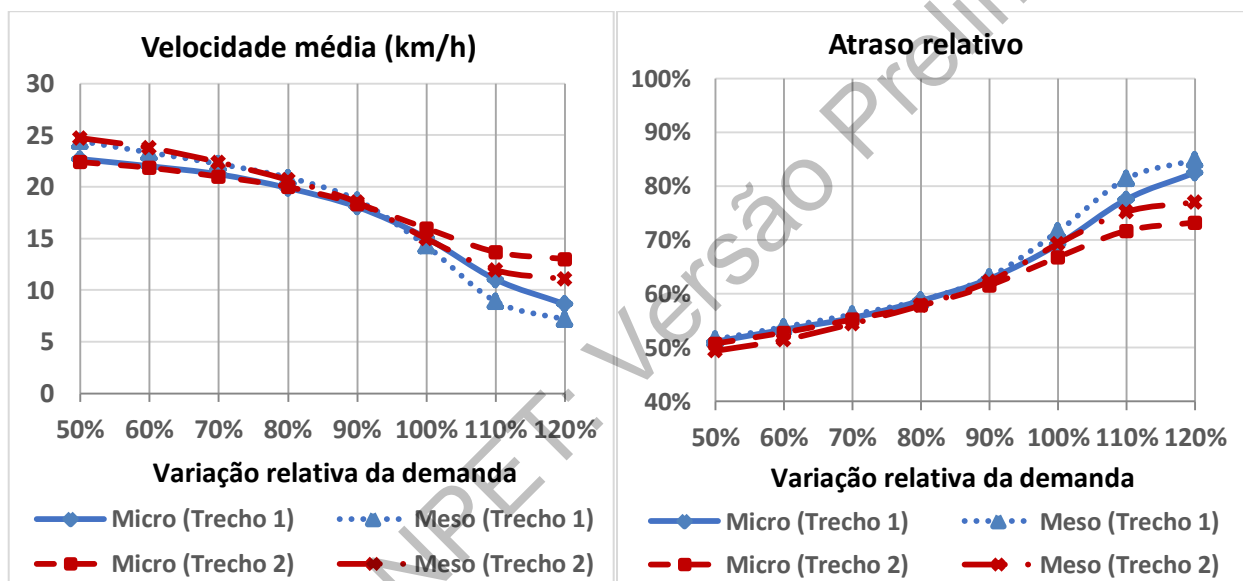


Figura 7: Velocidade média e atraso relativo com variações progressivas da demanda

5. CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo comparar as simulações mesoscópica e microscópica do VISSIM na modelagem de vias arteriais urbanas. Uma diferença importante entre as duas abordagens é que a simulação meso não permite a modelagem de pedestres e ciclistas, e a modelagem do transporte público é bastante simplificada.

A calibração dos modelos de *car-following* das duas redes foi capaz de reduzir o erro de estimação de velocidade média para valores aceitáveis. Os esforços de calibração do modelo de *car-following* das duas abordagens são semelhantes, já que o parâmetro *meso standstill distance* tem o mesmo conceito do parâmetro *ax* e o parâmetro *tempo de reação* é análogo aos parâmetros *bx_add* e *bx_mult*.

A principal diferença entre as estimativas dos dois modelos se deu nas aproximações transversais das interseções não semaforizadas, com a diferença de atraso entre a micro e a meso de até 158 s (510%). Uma hipótese para explicar essa diferença é que, como na modelagem mesoscópica há maior uniformidade das brechas na via principal, isso pode afetar

consideravelmente o processo de aceitação de brechas. Para as aproximações semaforizadas, os valores de velocidade média e de atraso foram similares.

Na análise por trecho da via principal, praticamente não houve diferenças nas estimativas de velocidade média e de atraso médio entre os dois modelos calibrados. Com relação à variabilidade dos resultados, ambos os modelos geraram estimativas com desvios padrões semelhantes.

Quanto à eficiência computacional, a simulação da rede meso foi aproximadamente quatro vezes mais rápida do que a simulação da rede micro. Em redes de maior porte e em esforços de calibração que requeiram alto número de replicações, essa razão pode crescer e ser decisiva na escolha pela modelagem mesoscópica.

Como sugestão para trabalhos futuros, a comparação entre as duas abordagens pode ser feita para vias com diferentes características físicas e operacionais, como número de faixas, densidade de semáforos e de paradas de ônibus e nível de demanda. Sugere-se também uma análise mais aprofundada das diferenças observadas nas estimativas das medidas de desempenho do tráfego das aproximações secundárias de interseções não semaforizadas, avaliando, por exemplo, o efeito de diferentes padrões de chegada de veículos na via principal.

Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES e ao CNPq o suporte financeiro por meio de bolsas e recursos de custeio.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Caliper (2018) TransModeler 5.0. Manual do Usuário. Caliper Corporation, USA.
- Ciuffo, B.; J. Casas; M. Montanino; J. Perarnau e V. Punzo (2013) Gaussian Process Metamodels for Sensitivity Analysis of Traffic Simulation Models: Case Study of AIMSUN Mesoscopic Model. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 2390, p. 87-98. DOI: 10.3141/2390-10.
- DENATRAN (2014) Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito. Volume V – Sinalização Semafórica.
- Ehlert, A.; A. Schneck; e N. Chanchareon (2017) Junction Parameter Calibration for Mesoscopic Simulation in Vissim. *Transportation Research Procedia*, v. 21, n. 0, p. 216-226. DOI: 10.1016/j.trpro.2017.03.091.
- 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.
- Mahut, M. (2001) *A Discrete Flow Model for Dynamic Network Loading*. Tese de Doutorado, Departamento de Ciência da Computação e Pesquisa Operacional, Universidade de Montreal, Montreal, Canadá.
- Maia, F. V. B. (2007) *Calibração e Validação de Modelos de Meso e Microsimulação do Tráfego para a Avaliação de Intervenções Tático-Operacionais na Malha Viária Urbana*. Dissertação de Mestrado, Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE.
- PTV (2018) VISSIM 11.0. Manual do Usuário. Planung Transport Verkehr AG, Karlsruhe, Germany.
- TRB (2010) *Highway Capacity Manual*. Transportation Research Board, v. 3, Washington.
- TSS (2013) Aimsun 8. Manual do Usuário de Simuladores Dinâmicos. Transport Simulation Systems, Barcelona, Spain.

Alessandro Macêdo de Araújo (alessandro.araujo@det.ufc.br)
Diego Barbosa Fontes (diegobfontes@det.ufc.br)
Matheus Fontenelle Siqueira (matheusfs@det.ufc.br)
Manoel Mendonça de Castro Neto (manoel@det.ufc.br)
Departamento de Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará
Campus do Pici, Bloco 703, Fortaleza, CE, Brasil