

CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO FLUXO-VELOCIDADE DO INTEGRATION PARA VIAS URBANAS SEMAFORIZADAS

Diogo Artur Tocacelli Colella

Ed Pinheiro Lima

Sergio Henrique Demarchi

Universidade Estadual de Maringá

Departamento de Engenharia Civil

Grupo de Engenharia de Transportes

RESUMO

O objetivo deste trabalho é calibrar e validar o modelo fluxo-velocidade do INTEGRATION a partir de espaçamentos e velocidades observados em vias urbanas semaforizadas de Maringá, PR. A velocidade de fluxo livre foi estimada para volumes leves de tráfego e a densidade de congestionamento estimada a partir dos espaçamentos dos veículos em filas formadas a montante de interseções semaforizadas. Os parâmetros restantes do modelo foram definidos iterativamente, de forma a produzir uma dispersão de espaçamentos e velocidades, através de simulação, que fosse similar à dispersão observada em campo. Constata-se que a calibração do modelo fluxo-velocidade utilizando dados microscópicos não agregados é possível de ser feita, mas para que o modelo possa representar com maior precisão o comportamento dos veículos em diversos locais da via é necessário calibrá-lo e validá-lo a partir de dados coletados tanto no meio do segmento como nas proximidades das interseções.

ABSTRACT

In this paper, the INTEGRATION speed-flow relationship is calibrated and validated against speeds and distance headways measured at signalized arterial streets in Maringá, PR. Initially, free-flow speed is estimated for low traffic volumes, while jam density is defined as a function of the average distance headway of passenger cars queued upstream to signalized intersections. An iterative procedure is used to calibrate the remaining parameters, in order to produce a simulated-based scatter plot of distance headways and speeds which is the most similar to the field scatter plot. It is demonstrated that the calibration and validation of speed-flow models based on microscopic non-aggregated data is practically feasible. However, the speed-flow model is only capable of representing vehicle behavior in the whole link if calibrated against data collected in the middle of the link and close to intersections as well.

1. INTRODUÇÃO

Os simuladores de tráfego são ferramentas cada vez mais utilizadas como suporte ao processo de gerenciamento da operação viária e análise do desempenho de sistemas de tráfego de grande complexidade (Hourdakakis *et al.*, 2003). No entanto, para representar adequadamente o sistema real, é necessário que diversos parâmetros do simulador sejam calibrados. Por exemplo, o simulador INTEGRATION (Rakha, 2002) requer a calibração de quatro parâmetros apenas para o modelo fluxo-velocidade, sendo que ainda existem outros parâmetros que podem afetar o desempenho dos veículos e o comportamento dos veículos na corrente de tráfego simulada.

A calibração dos modelos de fluxo normalmente é feita a partir do ajuste de uma relação funcional entre os dados de fluxo, velocidade e densidade, coletados em rodovias através de câmeras filmadoras posicionadas em locais elevados (Hurdle e Datta, 1983; Persaud e Hurdle, 1988), ou através de sensores permanentes (Hellinga e Van Aerde, 1994; Stewart *et al.*, 1995) e sensores portáteis (Demarchi e Setti, 2000) instalados no pavimento.

Entretanto, existe uma série de dificuldades relacionadas ao procedimento tradicional de calibração macroscópica da curva fluxo-velocidade, tais como a necessidade de se coletar dados durante longos períodos de tempo e em diferentes locais para se obter dados que caracterizem todas as regiões da curva fluxo-velocidade (May, 1990; Hall, 1992; Hall *et al.*, 1992). Além

disso, as contagens volumétricas e respectivas velocidades dos veículos são agregadas em intervalos de tempo, seja durante ou após a coleta de dados, o que pode interferir na estimativa dos parâmetros do modelo. Intervalos de agregação mais longos produzem menor dispersão de pontos em relação à curva fluxo-velocidade, mas em compensação podem mascarar variações súbitas das condições de tráfego que podem ocorrer dentro de um intervalo de coleta. Os intervalos de tempo menores, por sua vez, provocam uma maior dispersão dos dados, dificultando o ajuste da curva fluxo-velocidade (Demarchi e Setti, 2000).

Além dos aspectos mencionados é importante considerar também que os sensores de tráfego permanentes ou portáteis têm custo elevado e nem sempre estão disponíveis em todas as cidades, especialmente as de porte médio, sendo necessário buscar alternativas para a coleta de dados quando se deseja calibrar uma relação fluxo-velocidade para vias urbanas. Uma destas alternativas é a utilização de câmeras filmadoras digitais e posterior tabulação dos dados da filmagem em uma planilha eletrônica. Atualmente, com o uso de softwares de edição de vídeo, é possível identificar os instantes de passagem dos veículos por uma ou mais seções de controle na via com uma precisão de 1/30 de segundo, o que permite a obtenção de headways, velocidades e espaçamentos para cada veículo com grande precisão. Embora exista uma limitação da duração do período de coleta, já que o processo de redução dos dados do vídeo para planilhas eletrônicas é, em geral, feito manualmente, os dados obtidos não possuem qualquer tipo de agregação, eliminando os problemas de calibração mencionados anteriormente.

Por outro lado, a calibração e validação do modelo fluxo-velocidade utilizando dados microscópicos deve ser feita também microscopicamente, considerando que para cada modelo macroscópico de fluxo velocidade existe um modelo microscópico de “car-following” correspondente, ambos calibrados com o mesmo conjunto de parâmetros (a relação entre modelos macroscópicos e microscópicos é discutida por May, 1990 e Rakha e Crowther, 2002). No caso de simuladores de tráfego, a calibração é feita através da variação dos parâmetros e execução de simulações que fornecem resultados similares aos observados em campo, enquanto que a validação do modelo é a comparação dos resultados obtidos por simulação com os dados observados (Hourdakakis *et al.*, 2003). O modelo é considerado calibrado quando dados observados e obtidos por simulação forem similares.

Dessa maneira, o objetivo deste trabalho é calibrar e validar a relação fluxo-velocidade do simulador INTEGRATION para vias urbanas de Maringá a partir de dados microscópicos de espaçamento e velocidade obtidos através de filmagem. Considerando que a calibração e validação microscópica de modelos de fluxo não é usual, esta pesquisa também objetiva investigar a viabilidade prática deste método alternativo.

Para alcançar os objetivos mencionados, o trabalho está dividido em 7 tópicos, incluindo esta introdução. No item 2 são feitas considerações sobre os parâmetros utilizados pelo simulador INTEGRATION para modelar o comportamento dos veículos na corrente de tráfego. No item 3 é apresentado o método proposto para calibração desses parâmetros. No item 4 é descrito o processo de filmagem e redução de dados para obtenção de espaçamentos e velocidades. No item 5 descreve-se o processo de calibração iterativa do INTEGRATION e validação a partir da comparação entre dados observados e obtidos por simulação. No item 6 é feita a análise dos resultados obtidos e, no item 7 são apresentadas as conclusões e recomendações do trabalho.

2. CALIBRAÇÃO DO COMPORTAMENTO VEICULAR NO INTEGRATION

O simulador INTEGRATION possui uma concepção um pouco diferente em relação a outros si-

muladores na medida em que a relação fluxo-velocidade deve ser definida para todos os segmentos de vias, mesmo os semaforizados. A única diferença considerada é que, nos segmentos semaforizados, um veículo virtual é posicionado na aproximação da interseção durante todo o tempo em que o semáforo permanece fechado. Dessa forma, os veículos que chegam à interseção e encontram o semáforo fechado são forçados a parar atrás do veículo virtual, posicionando-se com espaçamentos iguais ao inverso do valor da densidade de congestionamento.

Quando a indicação de verde é mostrada, o veículo virtual é retirado e os veículos da fila voltam a mover-se livremente. É interessante notar que em todo o período da simulação, mesmo durante a indicação de vermelho, o movimento dos veículos é sempre definido pela relação interveicular, associada a um modelo de frenagem na fase de desaceleração e um modelo de desempenho veicular (Rakha *et al.*, 2001) na fase de aceleração e retomada de velocidade, o que torna desnecessário especificar valores de fluxo de saturação e tempos perdidos para definir o padrão de descarga da fila.

O modelo utilizado para definir a relação interveicular foi proposto por Van Aerde (1995), cujo equacionamento e definição de seus parâmetros é feita no item 2.1. Em seguida, no item 2.2, são destacados outros parâmetros que podem influenciar o comportamento veicular e, conseqüentemente, também devem ser calibrados.

2.1. O Modelo de Van Aerde

Van Aerde (1995) considera que o comportamento dos veículos é modelado segundo uma relação interveicular em que a velocidade de um veículo é função do espaçamento entre ele e outro veículo que trafega à sua frente. Os parâmetros do modelo são calibrados macroscopicamente para que o comportamento agregado do fluxo de tráfego possa ser representado pela relação entre fluxo, velocidade e densidade definida para o segmento. A relação microscópica entre espaçamento e velocidade é definida pela equação (1), que consiste em uma variação algébrica (Demarchi, 2003) da formulação originalmente proposta por Van Aerde:

$$s = \frac{1}{k_j} \left[\frac{v_f (v - v_c)^2}{v_c^2 (v_f - v)} \right] + \frac{v}{q_c} \quad (1)$$

em que s : espaçamento entre veículos consecutivos na mesma faixa de tráfego [km];
 v : velocidade [km/h];
 v_f : velocidade de fluxo livre [km/h];
 v_c : velocidade na capacidade do segmento [km/h];
 q_c : capacidade do segmento [veíc/h/faixa]; e
 k_j : densidade de congestionamento [veíc/km/faixa].

O modelo macroscópico fluxo-velocidade é obtido a partir da expressão (1), considerando que a densidade k da corrente de tráfego é o inverso do espaçamento s e que o fluxo q é o produto da densidade k pela velocidade v , conforme define a relação fundamental de fluxo de tráfego.

Dos quatro parâmetros do modelo de Van Aerde, somente a velocidade de fluxo livre e a densidade de congestionamento podem, em princípio, ser estimadas com maior precisão, pois representam as condições de contorno da curva. A velocidade de fluxo livre em vias arteriais pode ser estimada, segundo o HCM (TRB, 2000), a partir da utilização de um veículo teste equipado com um velocímetro calibrado, ou qualquer outro método que permita a medição de velocidades instantâneas. A seção adotada para coleta das velocidades deve estar localizada

no meio do segmento entre interseções e, no período de coleta, o volume de tráfego deve ser leve.

A densidade de congestionamento em vias urbanas pode ser estimada a partir do espaçamento entre automóveis posicionados nas filas que se formam nas aproximações de interseções semaforizadas durante a indicação de vermelho, pois este é o tipo de fila mais comum de ser observado, especialmente no sistema viário de cidades de porte pequeno ou médio em que congestionamentos recorrentes ou incidentais não ocorrem frequentemente (Demarchi *et al.*, 2003).

Entretanto, a capacidade do segmento e a velocidade na capacidade são mais difíceis de se estimar pois é difícil observar vias urbanas de cidades de porte médio que operam com volumes próximos a sua capacidade. Esta dificuldade é contornada, no caso desta pesquisa, através do procedimento descrito no item 5.3.

2.2. Outros Parâmetros que Interferem no Comportamento Veicular

Além dos parâmetros de calibração do modelo fluxo-velocidade do INTEGRATION, dois outros parâmetros podem ser utilizados para alterar o comportamento dos veículos na corrente de tráfego. O coeficiente de variação da velocidade (C_{V_v}) corresponde à razão entre o desvio-padrão e o valor da velocidade determinada pela equação (1). Dessa forma, $0 < |C_{V_v}| \leq 0,5$ faz com que as velocidades e espaçamentos dos veículos sejam distribuídas aleatoriamente segundo uma distribuição normal, caso C_{V_v} seja positivo, ou log-normal, caso C_{V_v} seja negativo (Rakha, 2002). Isso resulta em uma maior dispersão dos pontos espaçamento-velocidade em relação à curva calibrada. No entanto, essa dispersão não permite obter velocidades maiores que a velocidade de fluxo livre.

O segundo parâmetro é a proporção da potência máxima do motor (P_{pmax}) que os veículos efetivamente utilizam. Este parâmetro pode ser utilizado para modelar as características de desempenho dos veículos que aceleram assim que ocorre a abertura do semáforo ou quando retomam sua velocidade, constituindo assim um artifício para modelar indiretamente a agressividade dos motoristas durante o processo de aceleração.

3. MÉTODO PROPOSTO

O método proposto para calibração e validação do modelo fluxo-velocidade do INTEGRATION para vias urbanas de Maringá baseia-se na comparação da dispersão de pontos espaçamento-velocidade obtidos em campo com dados similares obtidos por simulação. Através de filmagem são obtidos os pontos que sugerem o possível formato da relação entre espaçamento e velocidade, conforme descrito no item 4. O processo de calibração envolve a execução de várias simulações, sendo que em cada uma delas é considerado um conjunto diferente de parâmetros. A validação do modelo, ou seja, a comparação da dispersão dos pontos observados e estimados por simulação permite o cálculo de uma medida de erro que, ao ser minimizada, fornece os valores dos parâmetros de calibração procurados.

Embora fosse possível a calibração simultânea dos seis parâmetros mencionados neste texto, foi decidido adotar a velocidade de fluxo livre e a densidade de congestionamento a partir de estimativas previamente obtidas, conforme é descrito, respectivamente, nos itens 5.1 e 5.2. Essa estratégia reduziu o número de simulações necessárias para a obtenção dos outros quatro parâmetros (capacidade, velocidade na capacidade, coeficiente de variação da velocidade e proporção da aceleração máxima efetivamente utilizada), conforme é descrito no item 5.3.

4. ESPAÇAMENTOS E VELOCIDADES OBSERVADAS

Para obter espaçamentos e velocidades em campo, as coletas de dados foram feitas em vias de pista dupla, sendo a maioria delas separadas por canteiro central, utilizando uma câmera filmadora digital Sony, modelo TRV 130, posicionada de forma a permitir a visualização de todas as faixas de tráfego e a identificação da passagem dos veículos por seções de controle.

As filmagens foram realizadas em dois momentos distintos, sendo os dados de cada amostra utilizados para propósitos diferentes. Entre maio e julho de 2002 foram realizadas 2,5 h de filmagens em pontos localizados no meio de trechos entre interseções. Estes dados foram utilizados para estimar a velocidade de fluxo livre (item 5.1). Entre os meses de fevereiro e junho de 2003, mais 7,3 h de filmagem foram feitas em locais a montante de interseções semaforizadas. Estes dados foram adotados como base de comparação com os dados similares obtidos por simulação e estimativa de quatro dos parâmetros de calibração (item 5.3).

As filmagens foram transformadas em formato digital (arquivos AVI) utilizando uma conexão do tipo *Firewire* (IEEE 1394) e o aplicativo de edição de vídeo *Pinnacle Studio DV*. Inicialmente, foram definidas linhas superpostas ao vídeo para identificar as seções de controle *a* e *b*, mostradas na Figura 1. As seções de controle correspondem a elementos facilmente distinguíveis na filmagem, tais como árvores no canteiro central das vias, ou a faixa de retenção e faixas de pedestres próximas a interseções. A distância entre as seções foi medida em campo com o auxílio de uma trena e, no caso da Figura 1, corresponde a 5,55 m.



Figura 1: Seções de controle destinadas à redução de dados da filmagem

A redução dos dados foi feita por dois pesquisadores. Um deles identificava os instantes de passagem do pára-choque traseiro de um veículo pelas duas seções de controle (t^a e t^b , respectivamente), informando os instantes na forma de minuto, segundo e quadro (equivalente a 1/30 s) para outro pesquisador, que digitava os dados em uma planilha. Inicialmente, os instantes de passagem e tipos de todos os veículos foram colocados em uma única planilha, mas em seguida foram separados em planilhas distintas em função da faixa de tráfego. Considerando então uma mesma faixa de tráfego, os instantes de passagem de cada veículo por uma determinada seção podem ser calculados através de:

$$t_i = 60m_i + sg_i + \frac{fr_i}{30} \quad (2)$$

em que t_i : instante de passagem do i -ésimo veículo por uma das seções de controle [s];
 m_i : minuto do instante de passagem [min];
 sg_i : segundo do instante de passagem [s];

fr_i : quadro referente ao instante de passagem (1 quadro = 1/30 s).

O *headway* do i -ésimo veículo (h_i) é a diferença entre seu instante de passagem pela seção a (t_i^a) e o instante de passagem do veículo $i - 1$ pela mesma seção (t_{i-1}^a):

$$h_i = t_i^a - t_{i-1}^a \quad (3)$$

A velocidade do i -ésimo veículo (v_i , em km/h) é a razão entre a distância entre as seções a e b (Δd) e a diferença entre os instantes de passagem t_i^b e t_i^a :

$$v_i = 3,6 \frac{\Delta d}{t_i^b - t_i^a} \quad (4)$$

O espaçamento s_i do veículo i (expresso em m) é calculado a partir de:

$$s_i = \frac{v_i}{3,6} h_i \quad (5)$$

5. CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DOS PARÂMETROS

O processo de calibração dos 6 parâmetros mencionados no item 2 pode ser dividido em três etapas distintas. No item 5.1 é apresentado o procedimento para estimativa da velocidade de fluxo livre, no item 5.2 é descrita forma de se determinar a densidade de congestionamento e, no 5.3, o processo de estimativa dos parâmetros restantes.

5.1. Determinação da Velocidade de Fluxo-Livre

A velocidade de fluxo livre v_f foi estimada a partir de parte dos dados obtidos em 2002, considerando somente os automóveis que seguiam outros veículos trafegando na faixa mais próxima ao canteiro central das avenidas. Este critério foi adotado para que o valor da velocidade de fluxo livre não fosse influenciado pelo desempenho limitado de veículos pesados, nem pelos veículos que eventualmente estacionam junto ao meio fio. Além disso, foram considerados somente os automóveis trafegando com espaçamentos maiores que 80 metros, em virtude de uma inspeção visual dos pontos espaçamento-velocidade mostrar que, para valores maiores que 80 m, a velocidade podia ser considerada como independente do espaçamento.

A partir dos dados selecionados, uma distribuição de frequências relativas acumuladas foi elaborada para cada um dos locais de coleta, mostrando que o valor correspondente ao 85º percentil de cada distribuição variava entre 54,7 e 57,9 km/h. Dessa forma, foi considerado que um valor razoável para a velocidade de fluxo seria 58 km/h, bem próximo do limite de velocidade estabelecido para essas vias, que é de 60 km/h.

5.2. Determinação da Densidade de Congestionamento

A densidade de congestionamento foi obtida a partir do espaçamento de congestionamento estimado por Demarchi *et al.* (2003). Neste estudo, os autores determinaram espaçamentos médios medindo a extensão e a respectiva quantidade de automóveis de 135 filas observadas em quatro aproximações de interseções semaforizadas de Maringá, durante os instantes em que os semáforos encontravam-se fechados para tais aproximações. O espaçamento médio estimado para as 135 observações é igual a 6,06 m, o que corresponde a uma densidade de congestionamento $k_j = 165$ cp/km/faixa.

5.3. Determinação dos Parâmetros Restantes

A calibração dos parâmetros q_c , v_c , Cv_v e P_{Pmax} baseia-se no seguinte procedimento: primei-

ramente, são definidos os percentuais de pontos em deferentes regiões do gráfico espaçamento-velocidade (item 5.3.1). As simulações são realizadas conforme é descrito no item 5.3.2, considerando combinações de parâmetros definidas através de técnicas de planejamento fatorial (item 5.3.3) e um procedimento de busca da solução ótima.

5.3.1. Distribuição percentual dos Pontos pelo Gráfico Espaçamento-Velocidade

Para realizar as comparações entre valores empíricos e simulados, um gráfico contendo os espaçamentos e velocidades de 2457 automóveis observados nas 5 interseções filmadas no ano de 2003 foi elaborado (Figura 4). Em seguida, esse gráfico foi dividido em regiões, cujos limites foram definidos por valores de velocidades múltiplos de 10 km/h e espaçamentos múltiplos de 20 metros, exceto pela última categoria destinada aos espaçamentos maiores que 200 m. Considerando que o total de observações em campo pode diferir do total de pontos obtidos por simulação, o percentual de pontos em cada região do gráfico foi calculado, obtendo-se uma matriz de percentuais, cuja soma das células é igual a 1,00. Dessa maneira, a comparação das distribuições de pontos observados e obtidos por simulação é feita em termos relativos.

5.3.2. Execução de Cada Simulação

As simulações foram executadas em uma rede que replica as condições geométricas e de controle dos locais de coleta dos dados. A rede utilizada é composta por 3 segmentos, cada um deles com 200 m de extensão e uma única faixa de tráfego. No segundo segmento foi posicionado um semáforo com tempo de ciclo igual a 70 s, 32 s de verde, 1 s de amarelo e 37 s de vermelho, similar ao que é observado nas interseções semaforizadas do centro de Maringá. Em função das taxas de fluxo médias observadas nas coletas em campo, a demanda definida para as simulações foi de 466 veic/h/faixa. Foi considerado ainda que esta demanda seria formada pelas proporções de veículos com diferentes potências de motor, conforme mostra a Tabela 1.

Tabela 1: Tipos de veículos considerados nas simulações

Veículo	Potência (kW)	% do total
Carro de passeio 1.0	51,50	40
Carro de passeio 1.4	62,50	25
Carro de passeio 1.6	75,40	20
Carro de passeio 2.0	80,88	15

Após a escolha dos parâmetros de calibração, uma simulação de 1 h era feita, gerando um arquivo de resultados contendo as distâncias em relação ao nó de origem da rede, percorrida por cada um dos veículos e suas respectivas velocidades instantâneas a cada segundo de simulação. Em seguida, uma macro em Visual Basic foi utilizada para abrir o arquivo de resultados em uma planilha eletrônica, ordenar os veículos sequencialmente em função de seu atributo identificador (ID) e calcular os espaçamentos e velocidades dos veículos ao passarem por uma seção de controle definida 5 m após o semáforo (ou 405 m após o nó de entrada na rede). Esta macro também calculava automaticamente os percentuais de pontos obtidos por região do gráfico espaçamento-velocidade, adotando os mesmos limites definidos anteriormente.

5.3.3. Planejamento das Simulações e Calibração Iterativa dos Parâmetros

As simulações foram realizadas adotando-se de forma iterativa diferentes valores de parâmetros. Para reduzir o número de simulações, foi utilizado um planejamento fatorial com dois níveis para cada parâmetro, indicados na primeira linha da Tabela 2. A combinação dos parâmetros produziu 16 simulações, uma para cada combinação. Após a execução das 16 simula-

ções e obtenção dos percentuais de pontos por região do gráfico espaçamento-velocidade, uma medida de erro δ foi calculada para cada uma das simulações através da seguinte expressão:

$$\delta = \frac{\sum_{i,j} |p_{i,j}^{obs} - p_{i,j}^{est}|}{n} \quad (6)$$

em que $p_{i,j}^{obs}$: porcentagem dos pontos na região i, j do gráfico de valores observados;

$p_{i,j}^{est}$: porcentagem dos pontos na região i, j do gráfico de valores obtidos por simulação; e

n : número de regiões em que os gráficos foram divididos.

Após o cálculo dos valores de δ para cada uma das simulações, um novo conjunto de parâmetros era selecionado para a próxima iteração conforme ilustra a Figura 2 (elaborada para o caso de dois parâmetros por questões de representação do desenho em duas dimensões). Nesta Figura, se o erro mínimo é obtido para o nível superior do parâmetro 1 e nível inferior do parâmetro 2, os valores dos níveis para a segunda iteração são definidos da seguinte maneira: o novo nível inferior para o parâmetro 1 é a média dos níveis superior e inferior da primeira iteração, enquanto que o nível superior permanece o mesmo. No caso do parâmetro 2, o nível inferior é mantido e o nível superior calculado como a média dos níveis adotados na iteração 1.

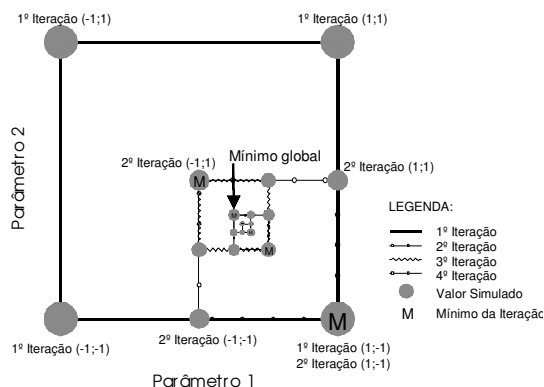


Figura 2: Procedimento adotado para busca dos parâmetros que minimizam o erro

Dessa forma, à medida que a diferença entre valores dos níveis inferior e superior dos parâmetros vai diminuindo, a região de busca também se torna menor. Quando os níveis superior e inferior dos parâmetros tornam-se próximos ou iguais, o processo de busca é finalizado e os parâmetros de calibração são encontrados (o mínimo global na Figura 2). Este procedimento é similar para qualquer número de parâmetros a serem calibrados.

No caso dos quatro parâmetros do INTEGRATION, a busca dos valores ótimos foi feita em um hipercubo de 4 dimensões, cujos erros em cada vértice determinados a partir de 112 simulações, divididas em 9 iterações, como mostra a Tabela 2. Deve ser observado que a convergência para os valores finais ocorreu mais rapidamente para v_c (6ª iteração), P_{Pmax} e Cv_v (ambos na 7ª iteração). Na última iteração somente o valor de q_c foi variado, sendo os restantes mantidos fixos nos valores encontrados anteriormente.

Tabela 2: Parâmetros definidos em cada iteração e respectivos erros

Iteração	q_c		v_c		$P_{pmáx}$		Cv_v		Erro mínimo
	mín	máx	mín	máx	mín	máx	mín	máx	
1	1500	2200	15	40	0,50	1,00	0,00	0,50	0,0091
2	1850	2200	27	40	0,50	0,75	0,25	0,50	0,0085
3	2025	2200	27	34	0,50	0,63	0,37	0,50	0,0085
4	2112	2200	27	31	0,50	0,57	0,43	0,50	0,0083
5	2112	2156	27	29	0,50	0,54	0,46	0,50	0,0083
6	2112	2134	27	28	0,50	0,52	0,48	0,50	0,0083
7	2112	2123	27		0,50	0,51	0,49	0,50	0,0083
8	2112	2117			0,50			0,50	0,0083
9	2115								0,0083
Final	2115 cp/h/faixa		27 km/h		0,50		0,50		0,0083

6. ANÁLISE DOS RESULTADOS

As Figuras 3 e 4 apresentam, respectivamente, os pontos espaçamento-velocidade observados em campo e estimados através de simulação, considerando a curva espaçamento-velocidade calibrada com os parâmetros obtidos na etapa anterior. Embora o número de pontos observados em campo seja muito maior (cerca de 2500 pontos observados contra 460 pontos estimados por simulação), é possível perceber que a dispersão é similar em ambos os gráficos, exceto pelo fato que para cerca de 2% das observações a velocidade é maior que 60 km/h. Deve ser notado que só foi possível replicar a grande variabilidade dos dados observados em campo ao se adotar o valor máximo de Cv_v permitido no INTEGRATION, isto é, 0,50.

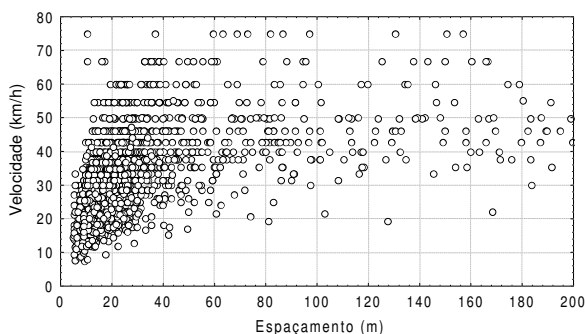


Figura 3: Espaçamentos e velocidades a montante do semáforo (valores observados)

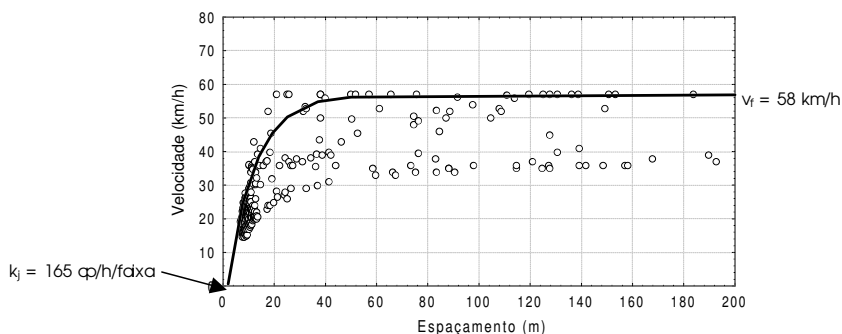


Figura 4: Espaçamentos e velocidades a montante do semáforo (valores simulados) e curva espaçamento-velocidade

Embora fosse possível variar o valor de P_{Pmax} entre 0,00 e 1,00, optou-se por variá-lo entre 0,50 e 1,00 por considerar que valores menores que 0,50 poderiam subestimar o desempenho dos veículos acelerando logo após a abertura do semáforo. O valor de $P_{Pmax} = 0,50$ indica que, aparentemente, os motoristas não utilizam toda a potência do motor no processo de aceleração e retomada de velocidade, o que pode ser explicado pelo fato de que os veículos sempre estão trafegando em pelotões durante esse processo de retomada da velocidade nos momentos após a abertura do semáforo. A proximidade das interseções semaforizadas pode também limitar o percentual da potência máxima utilizado.

Os quatro parâmetros do modelo fluxo-velocidade ($v_f = 58$ km/h, $k_j = 165$ cp/km/faixa, $q_c = 2115$ cp/h/faixa e $v_c = 27$ km/h) sugerem que a curva fluxo-velocidade obtida para as vias urbanas de Maringá possui um formato similar ao previsto pelo modelo de Greenshields, conforme mostra a Figura 5, em que a velocidade na capacidade é igual à metade da velocidade de fluxo livre. No entanto, a capacidade é ligeiramente menor do que $4.v_f.k_j$, o que faz com que a curva seja um pouco achatada, se comparada ao formato parabólico do modelo de Greenshields. Conseqüentemente, o formato da curva densidade-velocidade, também mostrada na Figura 5, é praticamente uma reta.

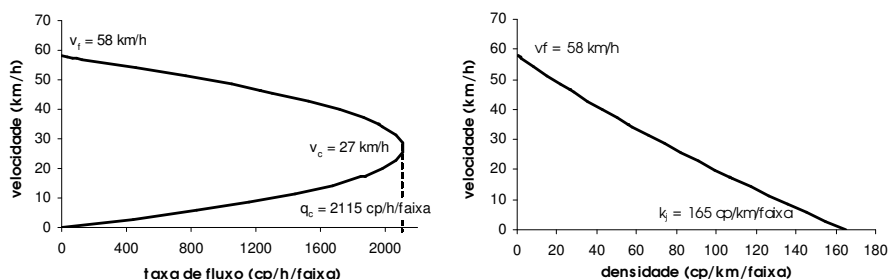


Figura 5: Relação fluxo-velocidade e densidade-velocidade obtida

Além da comparação dos resultados obtidos com os observados na seção de controle próxima às interseções semaforizadas, foi investigado se os parâmetros de calibração obtidos são capazes de replicar o comportamento dos veículos em outros locais da via (cujos dados não foram utilizados na validação), tal como uma seção localizada no meio do trecho entre interseções. Para isso, uma nova simulação foi feita, considerando agora um segmento não semaforizado.

A dispersão dos pontos espaçamento-velocidade coletados em campo no ano de 2002 (Figura 6) foi então comparada à dispersão dos pontos obtidos por simulação Figura 7. Neste caso, a dispersão é similar, mas o valor de $\delta = 0,0127$ é 50% maior que o valor de δ obtido na calibração dos parâmetros. Esse valor reflete a maior variação de velocidades no gráfico de valores observados, pois estes dados incluem as observações nas duas faixas de tráfego. Na faixa mais próxima ao meio fio, a velocidade da corrente de tráfego pode ser influenciada pelas manobras de estacionamento dos veículos, o que não ocorre na faixa mais próxima ao canteiro central. Infelizmente este aspecto não pode ser adequadamente simulado no INTEGRATION, pois a relação fluxo-velocidade é definida para todo o segmento, não para cada uma das faixas de tráfego existentes.

7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste trabalho, foram calibrados e validados os parâmetros da relação fluxo-velocidade utili-

zada pelo simulador INTEGRATION para modelar o comportamento dos veículos em vias urbanas da cidade de Maringá. Foi verificado, inicialmente, que é possível calibrar e validar uma relação macroscópica entre fluxo, velocidade e densidade a partir de variáveis microscópicas, através da identificação dos parâmetros que produzem espaçamentos e velocidades, obtidos por simulação, similares aos pontos observados em filmagens no campo. Este método alternativo permite a utilização de amostras de tamanho representativo, coletadas durante um intervalo menor de filmagem, e que não sofrem a influência dos efeitos da agregação de dados, conforme ocorre no processo tradicional de calibração macroscópica.

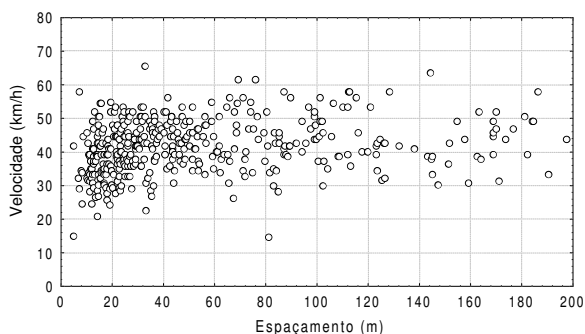


Figura 6: Espaçamentos e velocidades no meio do segmento viário (valores observados)

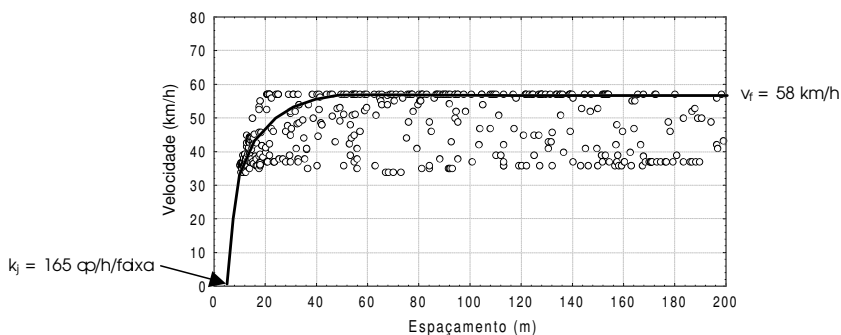


Figura 7: Espaçamentos e velocidades no meio do segmento viário (valores simulados) e curva espaçamento-velocidade

De uma forma geral, observa-se uma dispersão similar dos espaçamentos e velocidades obtidos por simulação com os valores observados em campo, exceto para velocidades maiores que 58 km/h, valor adotado para a velocidade de fluxo. Isto sugere que tal parâmetro deva ser, provavelmente, recalibrado, utilizando o procedimento iterativo descrito neste artigo. O mesmo pode ser feito, eventualmente, com a densidade de congestionamento, embora acredite-se que este parâmetro tenha sido estimado com precisão suficiente.

Outra conclusão obtida é que os parâmetros calibrados a partir de dados obtidos junto a uma interseção semaforizada conseguem replicar razoavelmente o comportamento dos veículos no meio do segmento, mas o erro entre percentuais observados e simulados é maior que o verificado na calibração. Isto reforça a influência que o local de coleta de dados tem no formato da curva calibrada. Considerando o caráter exploratório desta pesquisa, não foi possível coletar

mais dados em outros locais das vias. Recomenda-se que futuramente novas coletas sejam feitas em locais antes e após interseções, bem como no meio do tramo, buscando caracterizar adequadamente o comportamento dos veículos durante as fases de desaceleração, retomada de velocidade e velocidade constante. Neste caso, seria necessária a utilização simultânea de três filmadoras, cada uma delas posicionada num local do segmento. Outra possibilidade seria calibrar os parâmetros do modelo de forma que o INTEGRATION possa replicar os tempos de viagem entre interseções.

Com a definição dos parâmetros da relação fluxo-velocidade, mais uma fase do processo de calibração do INTEGRATION é concluída com relativo êxito, o que é fundamental para que o simulador possa representar adequadamente a operação do tráfego na malha urbana de Maringá.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Demarchi, S. H.; Setti, J. R. A. (2000) "Calibração da Relação Fluxo-Velocidade para uma Rodovia de Pista Dupla Brasileira. In: *Anais do XI Congresso Panamericano de Engenharia de Trânsito e Transportes*, p. 131-144. Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes, Gramado, RS.
- Demarchi, S. H. (2003) Uma Nova Formulação para o Modelo Fluxo-Velocidade-Densidade de Van Aerde. In: *Transporte e Transformação VII: Trabalhos vencedores do Prêmio CNT de Produção Acadêmica em 2002*. Confederação Nacional do Transporte, ANPET. Brasília, DF, 2003, v. 7, p. 77-94.
- Demarchi, S. H.; Colella, D. A. T.; Bertoncini, B. V. (2003). "Determinação da Densidade de Congestionamento em Filas de Interseções Semaforizadas". In: *Anais do XVII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*. Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes, Rio de Janeiro, v. 1, p. 476-488.
- Hall, F. L. (1992) Traffic Stream Characteristics. In: Gartner, N.; Messer, C.; Rath, H. K. (eds). *Traffic Flow Theory - A State-of-the-Art Report*, cap. 2. Transportation Research Board, Washington, D.C. Obtido em 25/04/2000 no endereço eletrônico <http://www.cta.ornl.gov/cta/research/trb/tft.html>.
- Hall, F.L.; Hurdle, V.F.; Banks, J.H. (1992). "Synthesis of Recent Work on the Nature of Speed-Flow and Flow-Occupancy (or Density) Relationships on Freeways". *Transportation Research Record* 1365, p. 12-18.
- Hellinga, B. R.; Van Aerde, M. (1994) "An Overview of a Simulation Study of the Highway 401 Freeway Traffic Management System". *Canadian Journal of Civil Engineering*, 21(3), p. 439-454.
- Hurdle, V. F.; Datta, P. K. (1983) "Speeds and Flows on an Urban Freeway: Some Measurements and a Hypothesis". *Transportation Research Record* 905, p. 127-137.
- Hourdakis, J.; Michalopoulos, P. G.; Kottommannil; J. (2003) "Practical Procedure for Calibrating Microscopic Traffic Simulation Models". *Transportation Research Record* 1852, p.130-139.
- May, A. D. (1990) *Traffic Flow Fundamentals*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.
- Persaud, B. N.; Hurdle, V. F. (1988) "Some New Data That Challenge Some Old Ideas About Speed-Flow Relationships". *Transportation Research Record* 1194, p. 191-198.
- Rakha, H. (2002) *INTEGRATION Release 2.30 for Windows: User's Guide*, Volumes 1 e 2, Michel Van Aerde & Associates Ltd., Blacksburg, VA.
- Rakha, H.; Lucic, I.; Demarchi, S.H.; Setti, J.R.A.; Van Aerde, M. (2001) "Vehicle Kinematics Model for Predicting Maximum Truck Acceleration Levels". *Journal of Transportation Engineering*, v. 127, n. 5, p. 418-425. American Society of Civil Engineers, ASCE.
- Rakha, H.; Crowther, B. (2002) "Comparison and Calibration of FRESIM and INTEGRATION steady-state car-following behavior". Artigo aceito para publicação em *Transportation Research*, part A.
- Stewart, J. A.; Rakha, H.; Van Aerde, M. (1995) "Analysis of Temporal and Spatial Variability of Free Speed Along a Freeway Segment". *Transportation Research Record* 1494, p. 1-10.
- Van Aerde, M. (1995) "A Single Regime Speed-Flow-Density Relationship for Congested and Uncongested Highways". Apresentado na 74th TRB Annual Conference, Washington, D.C. Paper nº 950802.
- TRB (2000) *Highway Capacity Manual*. Special Report 209. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC, EUA. 4ª ed. revisada.