

O uso da microssimulação na avaliação do desempenho da segurança viária

Flávio José Craveiro Cunto¹; Carlos Felipe Grangeiro Loureiro²

Resumo: Este artigo apresenta uma discussão sistematizada sobre os diversos aspectos que caracterizam o potencial do uso da microssimulação em estudos de segurança de tráfego. Inicialmente, faz-se uma revisão dos principais indicadores de desempenho da segurança viária, analisando sua evolução conceitual e a pertinência na utilização de modelos de microssimulação na sua estimativa. Em seguida, são descritas as principais características dos simuladores a serem observadas quando utilizados em estudos de segurança. São discutidos também aspectos referentes ao processo de calibração e validação dos algoritmos de modelagem microscópica para esse tipo de aplicação, além da necessidade de validar a relação entre indicador simulado e situações de risco de acidentes observadas em campo. Ao final, conclui-se que são inúmeras as oportunidades e os desafios de pesquisa nessa área, incluindo novas formas de representação dos conflitos/interações no tráfego, as simplificações inerentes aos algoritmos de modelagem microscópica, os procedimentos de calibração e validação desses algoritmos, assim como a validade relativa dos indicadores de desempenho para refletirem o contexto real da segurança viária.

Palavras-chave: simulação microscópica, segurança viária, indicadores proxy de segurança viária.

Abstract: This paper presents a systemized discussion on the different aspects that characterize the potential use of microscopic simulation in traffic safety studies. Initially, it is presented a literature review on the existing traffic safety performance measures, analyzing their conceptual evolution and the appropriateness of using microscopic simulation models in their estimation. Following, there is a description of the main characteristics of traffic simulators to be observed when applied to safety studies. There is also a discussion on the aspects related to calibrating and validating microscopic modeling algorithms for this type of application, as well as the need to validate the relationship between simulated measures and imminent accident situations observed on the field. At last, it is concluded that there are many research opportunities and challenges in this area, including new means of representing traffic conflicts/interactions, simplifications inherent to microscopic modeling algorithms, procedures for calibrating and validating these algorithms, as well as the relative validity of the performance measures to reflect the real context of road safety.

Keywords: microscopic simulation, road safety, surrogate safety measures.

1. INTRODUÇÃO

Na Engenharia de Transportes, por um lado, técnicos e pesquisadores almejam o desenvolvimento de projetos que promovam um nível adequado de segurança para todos os componentes dos seus subsistemas. Por outro lado, tomadores de decisão responsáveis pela gestão da circulação de pessoas e bens normalmente precisam alocar recursos limitados em estratégias que proporcionem maior fluidez e o menor risco possível de acidentes. Nesse contexto, torna-se essencial a criação de procedimentos sistemáticos para a avaliação do desempenho da segurança viária, seja no nível de planejamento estratégico ou de operação do tráfego.

Os acidentes de trânsito acontecem na sua maioria em virtude de uma sequência de eventos bastante específica que, em condições normais, não pode ser identificada. De acordo com Hauer (2002), torna-se difícil, por motivos éticos e operacionais, o projeto de experimentos com o intuito de avaliar o impacto de diferentes estratégias de engenharia na segurança do tráfego. Desta forma, o domínio mais comum dos engenheiros de segurança viária relaciona-se aos estudos observacionais, nos quais o conhecimento é obtido

por meio da análise metódica de eventos que não foram formalmente projetados para o problema em estudo (Cunto, 2008).

A abordagem mais frequente nos estudos de segurança viária faz uso de bancos de dados de acidentes de trânsito e técnicas estatísticas que procuram estabelecer um padrão entre atributos geométricos/operacionais e o número (ou taxa) de acidentes de trânsito observados em um determinado período. Dentre os problemas mais comumente associados a essa abordagem, encontram-se a baixa qualidade e confiabilidade dos dados disponíveis, além de fatores relacionados à natureza randômica e infrequente dos acidentes de trânsito que dificultam consideravelmente sua modelagem estatística (Hauer, 2002; Davis, 2004).

O uso de técnicas de simulação tem possibilitado o desenvolvimento de novas tecnologias voltadas para a otimização do desempenho operacional dos sistemas de transportes. Mais recentemente, o potencial para uso da microssimulação de tráfego em estudos do desempenho da segurança viária passou a ser investigado com maior interesse (Gettman e Head, 2003; Archer, 2005; Xin *et al.*, 2008). Um dos maiores atrativos deste tipo de abordagem é o fato de ser possível planejar experimentos em um ambiente virtual, evitando a exposição dos usuários “reais” a situações de risco.

Este trabalho tem por objetivo propor uma discussão e reflexão sobre os diversos aspectos que caracterizam o potencial do uso da microssimulação em estudos de segurança de tráfego. Para tanto, apresenta-se inicialmente uma revisão dos principais indicadores de desempenho da segurança viária, analisando sua evolução conceitual e a pertinência

¹ Flávio José Craveiro Cunto, Departamento de Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, Brasil. (e-mail: flaviocunto@det.ufc.br).

² Carlos Felipe Grangeiro Loureiro, Departamento de Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, Brasil. (e-mail: felipe@det.ufc.br).

na utilização de modelos de microsimulação na sua estimativa. A seguir, são descritos os atributos das plataformas de simulação que potencializam o uso desse ferramental em estudos de segurança. Por fim, são discutidos aspectos referentes ao processo de calibração e validação dos algoritmos de modelagem microscópica para esse tipo de aplicação, além da necessidade de validar a relação entre o indicador simulado e as situações de risco de acidentes observadas em campo.

2. INDICADORES DE DESEMPENHO DA SEGURANÇA DE TRÁFEGO

Historicamente, a segurança de tráfego tem sido expressa em termos do número de acidentes observados em porções da rede de circulação, ao longo de um intervalo de tempo (normalmente um ano), em grande parte pela relação lógica e intuitiva entre os dois. O uso dos acidentes de trânsito como único indicador de segurança traz, entretanto, uma série de desafios do ponto de vista de coleta e modelagem dos dados. Uma revisão em 18 pesquisas sobre a qualidade das informações sobre os acidentes de trânsito coletados pela polícia, hospitais e seguradoras na América do Norte e Canadá foi apresentada por Hauer e Hakkert (1989). Os resultados sugerem que a quantidade de acidentes não reportados aumenta com a redução de sua severidade. Mais especificamente, 20% dos acidentes com feridos graves, 50% com feridos leves e 60% com danos materiais não estão presentes nos bancos de dados.

Os acidentes de trânsito normalmente apresentam uma sequência de eventos hierárquicos complexos que se inter-relacionam e variam consideravelmente no tempo e no espaço, além de principalmente com as condições de tráfego. Essa característica de interdependência inerente ao processo dificulta o desenvolvimento de modelos estatísticos relacionando acidentes de trânsito aos atributos físicos e operacionais das vias. Dentre os principais problemas encontrados na literatura podem ser citados (Hauer, 2002; Davis, 2004):

- Elevada frequência de locais com “zero” acidentes;
- Dispersão excessiva dos dados (variância superior à média);
- Fenômeno de regressão à média;
- Problemas de colinearidade com as variáveis dos modelos; e
- Relações entre fatores contribuintes e acidentes estimadas em um nível agregado (grupo de acidentes) podem não ser válidas em um nível mais desagregado (acidente isolado), fenômeno conhecido como falácia ecológica.

Como alternativa ao uso dos acidentes em estudos de segurança, no final da década de 60, Perkins e Harris (1968) começaram a delinear as bases para o desenvolvimento de uma técnica que utiliza situações de risco entre veículos que não culminaram em acidentes, ou seja, os conflitos de tráfego. Como esse tipo de evento é bem mais frequente, quando comparado aos acidentes, análises estatísticas poderiam ser mais precisas. Ao longo dos anos essa abordagem incorporou conceitos e procedimentos diferentes em vários países, entretanto a técnica sueca de Análise de Conflitos de Tráfego, com o trabalho inicial de Hydén (1987), é uma das mais bem sucedidas, tendo sido aplicada em trabalhos

inclusive no Brasil (Pietrantônio, 1999; Robles e Raia Jr, 2008).

Portanto, observa-se a criação de um novo paradigma no qual o conceito de segurança no tráfego passa a ser visto como uma sequência de eventos cronologicamente dependentes que variam desde passagens sem distúrbio a acidentes. Esse conceito é conhecido como *continuum* de segurança, representado pela pirâmide de Hydén (1987), conforme mostrado na Figura 1.

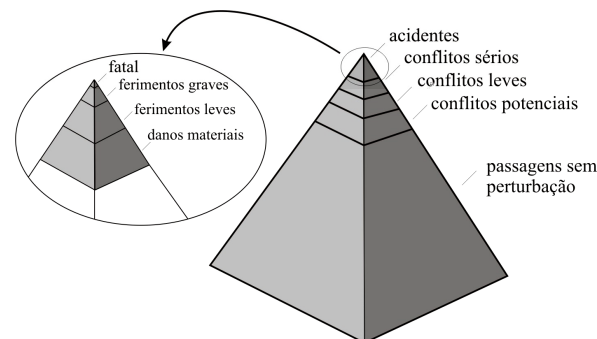


Figura 1. Pirâmide de Hydén (Fonte: Hydén, 1987)

Em linhas gerais, o volume da pirâmide correspondente a cada classe de evento pode ser relacionado à sua taxa de ocorrência. Entretanto, enquanto que os extremos da pirâmide são facilmente detectados, suas classes intermediárias carecem de definições claras e procedimentos objetivos para sua identificação. Desta forma, pesquisadores vêm tentando propor indicadores baseados na proximidade espaço-temporal entre veículos que reflitam situações de alto risco de colisão, também conhecidos como indicadores *proxy* de segurança viária (Gettman and Head, 2003; Archer, 2005).

O tempo para colisão (TTC - *time to collision*) foi um dos primeiros indicadores *proxy* propostos sendo baseado na proximidade temporal entre dois veículos. O TTC foi definido como “o tempo necessário para dois veículos colidirem se mantidas as mesmas velocidades e trajetórias” (Hayward, 1972). Para veículos na mesma direção, este índice pode ser calculado por meio da seguinte expressão:

$$TTC_{i,t} = \frac{(X_{i-1,t} - X_{i,t}) - L_{i-1,t}}{V_{i,t} - V_{i-1,t}} \quad (1)$$

em que,

- t : intervalo de tempo considerado;
- $i-1$: veículo líder;
- i : veículo seguidor;
- X : posição dos veículos;
- L : comprimento do veículo; e
- V : velocidade.

O TTC pode variar de infinito, quando os veículos não estão em rota de colisão, até valores mínimos da ordem de 1,0 a 1,5 s, comumente associados aos conflitos de tráfego (Hayward, 1972). Outros exemplos de indicadores *proxy* temporais propostos são: tempo para o acidente (TA - *time to accident*), tempo de invasão (ET - *encroachment time*), tempo pós-invasão (PET- *post-encroachment time*) e o tempo de brecha (GT - *gap time*) (Cooper e Ferguson, 1976; Hydén, 1987; Gettman e Head, 2003).

Um dos problemas que limitam a aplicação dos indicadores *proxy* temporais reside na dificuldade em relacioná-los com a severidade, tendo em vista que diferentes combina-

ções de espaçamento e velocidade podem resultar no mesmo valor do índice. Por exemplo, assumindo o conflito A, onde os veículos estejam 42 m distantes e se aproximem a uma taxa de 100 km/h, e o conflito B, onde o espaçamento seja de 4,2 m e a diferença de velocidade igual a 10 km/h, pela Equação 1, ambos resultarão em TTC igual a 1,5 s. Entretanto, é razoável esperar que o conflito A, caso ocorra a colisão, tenha severidade maior por conta do momento linear e energia cinética dissipada durante o processo.

Buscando superar essa limitação, uma segunda geração de indicadores foi proposta de modo a utilizar a taxa de desaceleração necessária para evitar a colisão. Por estar diretamente relacionada à energia do processo, teoricamente, esses indicadores podem considerar de maneira mais racional a severidade do conflito. Cooper e Fergurson (1976) fizeram um dos trabalhos pioneiros utilizando a taxa de desaceleração para evitar a colisão (DRAC – *Deceleration Rate to Avoid the Crash*). Este indicador permite a adoção de intervalos de valores com base no esforço de reação do condutor para a obtenção da taxa de desaceleração necessária. De maneira geral, as interações veiculares podem ser classificadas como severas para valores de DRAC acima de $3,0\text{m/s}^2$ (McDowell *et al.* 1983; Hydén, 1996).

Para veículos trafegando no mesmo sentido, o indicador DRAC pode ser calculado pela Equação 2.

$$DRAC_{i,t} = \frac{(V_{i,t} - V_{i-1,t})^2}{2[(X_{i-1,t} - X_{i,t}) - L_{i-1,t}]} \quad (2)$$

Avanços recentes nas técnicas de aquisição de dados em tempo real e nos sistemas inteligentes de transporte (ITS) contribuíram para o surgimento de medidas *proxy* de segurança de tráfego que incorporam o tempo de exposição dos veículos a um determinado nível de conflito. A premissa fundamental é a de que esses índices acumulados ao longo do tempo representariam melhor os riscos de um veículo em sua jornada quando comparados a medidas isoladas como o menor TTC ou a maior DRAC. Dentre os principais exemplos deste tipo de indicador encontram-se o *time exposed time to collision* (TET), *time integrated time to collision* (TIT), ambos definidos no trabalho de Minderhoud e Bovy (2001), assim como o parâmetro de densidade de risco (UD – *unsafety density*) de Barceló *et al.* (2003).

Buscando modelar melhor o fenômeno do conflito entre veículos, Cunto (2008) propôs um índice de potencial para acidentes (CPI – *crash potential index*) que procura estimar o nível de turbulência do tráfego. Essa turbulência é representada pelo somatório das interações entre pares de veículos trafegando na rede ao longo do tempo. As interações podem ser de dois tipos: longitudinais (veículos na mesma direção) ou transversais, ocorrendo todas as vezes que pares de veículos apresentam rota de colisão em um dado intervalo de tempo.

O CPI é calculado com base na DRAC e incorpora um componente estocástico que considera o tipo de veículo (veículos leves/pesados) e as condições do pavimento (seco/molhado) na probabilidade da obtenção da DRAC. Este componente é representado pela taxa máxima de desaceleração disponível (MADR – *maximum available deceleration rate*). O CPI é obtido para cada veículo de acordo com a expressão:

$$CPI_i = \frac{\sum_{t=t_i}^{t_f} P(MADR^{(a_1, a_2, \dots, a_n)} \leq DRAC_{i,t}) \cdot \Delta t \cdot b}{T_i} \quad (3)$$

em que,

- t_i : intervalo de tempo inicial para o veículo i [s];
- t_f : intervalo de tempo final para o veículo i [s];
- Δt : intervalo de tempo de observação [s];
- T_i : tempo total de viagem do veículo i [s]; e
- b : variável de estado (0 = sem interação; 1 = veículos interagindo).

Conforme mostrado na Figura 2, o componente estocástico da Equação 3 corresponde à área a esquerda da DRAC na função densidade de probabilidade da MADR (suposta normal), em um dado intervalo de tempo. Os parâmetros (distribuição) de MADR podem ser estimados a partir de experimentos de distância mínima de parada para veículos de certa categoria em condições específicas de pavimento (seco/molhado). Na situação hipotética da Figura 2, para um dado nível da DRAC, veículos pesados tem maior dificuldade em evitar o conflito do que os leves ($CPI_{veic.pesados,t} > CPI_{veic.leve,t}$).

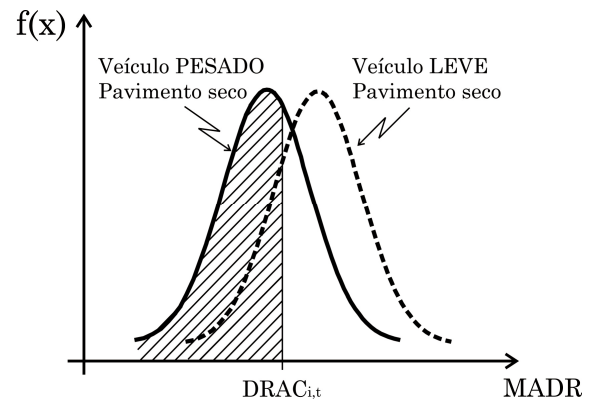


Figura 2. Função densidade de probabilidade da MADR (Fonte: Cunto, 2008)

Como principal conclusão dessa revisão sobre a evolução dos indicadores de desempenho da segurança viária, pode-se destacar que as características mais desejáveis dos indicadores *proxy* de última geração são:

- Captar interações/conflitos de modo contínuo, ao longo do tempo e do espaço;
- Expressar vários níveis de interação/conflito em sua formulação;
- Possibilitar a representação de interações/conflitos transversais e longitudinais;
- Permitir a avaliação da severidade de possíveis acidentes;
- Considerar diferentes tipos de veículos e diferenças entre veículos do mesmo tipo;
- Considerar diferenças nas condições ambientais (pavimento seco, molhado, etc.); e
- Permitir o seu cálculo de forma simples a partir de levantamentos de campo.

Muito embora os indicadores *proxy* contínuos, como TIT, TET, UD e CPI, tenham potencial para representar, de certo modo, os eventos que precedem a ocorrência dos aci-

dentes de trânsito, sua determinação exige um nível detalhado de informações, incluindo posição, velocidade e comprimento dos veículos de maneira contínua. Além disso, os estudos baseados nesses índices e em situações extremas (conflitos) necessitam de uma quantidade considerável de horas observadas para serem capazes de captar um número mínimo dessas ocorrências, de modo a produzir resultados estatisticamente significantes.

O ambiente da microssimulação, de maneira geral, propicia não só a obtenção de informações detalhadas dos veículos em tempo real de simulação, como também permite a repetição do cenário simulado indefinidamente, tornando-se, portanto, uma alternativa para a obtenção de indicadores *proxy* de segurança viária de maneira eficiente e com baixo custo. A próxima seção apresenta uma discussão a respeito das características mais importantes dos microssimuladores para a sua aplicação em estudos de segurança viária.

3. CARACTERÍSTICAS INERENTES AOS MICROSSIMULADORES

Vem-se observando nos últimos 10 anos um interesse crescente pelo uso da microssimulação em estudos de segurança viária. Em 2003, a FHWA (*Federal Highway Administration*) apresentou um estudo em que um dos objetivos era avaliar a capacidade de produção de indicadores *proxy* de segurança para interseções, utilizando nove microssimuladores: CORSIM, SIMTRAFFIC, VISSIM, HUTSIM, Paramics, TEXAS, AIMSUN, WATSIM e Integration. Os microssimuladores foram avaliados em termos de seus algoritmos para modelar as interações condutor/veículo, potencial para extração de dados, flexibilidade para calibração dos parâmetros do modelo e esforço para modificação do programa fonte ou resultados de saída para o cálculo do indicador *proxy*. O estudo não aponta superioridade evidente de um simulador específico, porém o relatório conclui que “o VISSIM e o Paramics parecem dispor de grande parte dos requisitos para a geração de indicadores *proxy* de segurança com um nível razoável de fidelidade” (Gettman e Head, 2003).

A seguir são discutidos os principais elementos inerentes às plataformas de microssimulação, com ênfase na sua aplicação em estudos de segurança viária, agrupados de acordo com três aspectos, a saber: entrada e saída dos dados, além dos seus algoritmos de modelagem das interações condutor/veículo.

3.1. Entrada de dados

Na etapa de entrada de dados é importante que a plataforma possibilite um alto grau de flexibilidade e detalhamento através de sua interface gráfica de desenho, do componente de controle de tráfego e dos elementos de entrada de fluxo veicular. A interface gráfica utilizada na representação da rede deve permitir um nível elevado de detalhes para a área simulada, incluindo:

- Especificação da largura de faixas;
- Posicionamento correto de faixas de retenção de tráfego;
- Possibilidade de inclusão de faixas de aceleração/desaceleração;
- Desenho de *links* circulares (rotatórias); e
- Possibilidade de utilização de fotos do local em segundo plano para auxiliar durante a codificação da

rede.

Os componentes de controle de tráfego devem representar adequadamente desde interseções controladas através de placas “Dê a preferência” e “PARE” até o controle semafórico, seja isolado, atuado pelo tráfego e/ou funcionando em coordenação com outras interseções. Os elementos de entrada de fluxo veicular, por sua vez, devem apresentar flexibilidade em termos de divisão direcional, composição do tráfego ao longo do tempo e por *link* (Archer, 2005).

3.2. Saída de dados

A grande maioria dos indicadores *proxy* de segurança recomendados para o uso com microssimulação precisam de informações detalhadas dos veículos para sua estimação. Consequentemente, quanto maior a quantidade de informações, e mais desagregada (individual e a cada intervalo de tempo), maior a capacidade de adequação do microssimulador.

Dentre os atributos essenciais dos dispositivos de saída de dados encontram-se: informar todas as variáveis de estado dos veículos individualmente ao longo da simulação; possibilitar a exportação e customização de arquivos de saída; representar com alta fidelidade a animação da simulação 2D e 3D; e possibilitar a extração de dados da simulação em tempo real através das interfaces de programação da aplicação (APIs).

3.3. Algoritmos de modelagem

Os algoritmos de modelagem são responsáveis pela representação dinâmica dos veículos na rede, tendo, portanto, papel fundamental no processo de simulação das interações veiculares e, consequentemente, dos conflitos de tráfego considerados na determinação dos indicadores *proxy*. Tradicionalmente, três algoritmos formam o núcleo dos sistemas de microssimulação, são eles: algoritmos de *car-following*, aceitação de brecha e mudança de faixa.

Os modelos de *car-following* (CFM) procuram representar o processo pelo qual condutores determinam sua velocidade e espaçamento em relação aos veículos à sua frente. Estes algoritmos são responsáveis diretos pela modelagem de interações/conflitos longitudinais que podem levar a ocorrência de colisões traseiras. Já os modelos de aceitação de brecha são usados para representar o processo decisório dos condutores em vias secundárias com o desejo de cruzar ou se inserir na corrente de tráfego principal, ou ainda de efetuar mudança de faixa de tráfego na via principal. Os eventos modelados por esse tipo de algoritmo podem resultar em interações/conflitos transversais de alta severidade pela diferença de velocidade entre os veículos envolvidos.

As mudanças de faixas de tráfego na microssimulação são representadas por meio de um processo de decisão hierárquico que considera que o desejo de mudar de faixa pode ocorrer em virtude de obstruções ou veículos lentos na faixa atual ou pela necessidade de ajustes na trajetória para acessar um determinado arco da rede. Uma vez que existe a motivação para a mudança, o processo passa a ser modelado de maneira similar aos algoritmos de aceitação de brecha.

Na microssimulação em ambiente rodoviário de pista simples, ressalta-se a necessidade de algoritmos para representação de ultrapassagens e a formação de pelotões, como os existentes nos aplicativos TRARR (Hoban *et al.*, 1985) e

TWOPAS (St. John e Harwood, 1986). Com o aperfeiçoamento desse tipo de algoritmo, espera-se um avanço na compreensão e estimação das interações veiculares longitudinais em sentidos opostos (colisões frontais).

A grande maioria dos algoritmos de microsimulação não foi desenvolvida para a modelagem da ocorrência de acidentes de trânsito com alta fidelidade. Em consequência, deve-se, na ausência de modelos mais adequados, privilegiar os algoritmos que possibilitem uma variação comportamental entre condutores, permitindo inclusive a ocorrência de situações de risco a partir de falhas no processo interativo entre os usuários.

Outras características gerais desejáveis nos algoritmos de microsimulação são: modelar reação ao estágio de amarelo/vermelho total; modelar tempo de reação variável entre condutores; considerar mais de um veículo à frente nas lógicas de CFM e mudança de faixa; possibilitar a interação entre veículos e pedestres; considerar a falta de atenção dos motoristas e pedestres; modelar velocidades em movimentos de conversão; e considerar o efeito da distância de visibilidade (Gettman e Head, 2003).

Outro aspecto importante a ser considerado diz respeito à formulação matemática dos algoritmos. Os parâmetros utilizados devem ter significado lógico e a estrutura do aplicativo deve permitir alterações dos valores dos parâmetros de modo simples e, se possível, interativamente. Outra característica fundamental é o acesso dos usuários aos códigos de programação, formulações matemáticas, hipóteses e simplificações que permeiam os algoritmos, tornando mais claro para o profissional as limitações de sua aplicação.

Por se tratar de um elemento fundamental no processo de simulação do desempenho da segurança viária, a próxima seção apresenta, em maiores detalhes, as principais características dos algoritmos de modelagem disponíveis no aplicativo comercial VISSIM, considerado pelo estudo da FHWA como uma das plataformas de microsimulação mais adequadas ao desenvolvimento de indicadores *proxy*.

4. ALGORITMOS DE MODELAGEM DO APLICATIVO VISSIM

O VISSIM é um *software* de microsimulação desenvolvido na Alemanha que tem como componente fundamental o modelo de *car-following* proposto por Wiedemann (1974) utilizando estudos na área de psicologia. A suposição principal no CFM de Wiedemann é a de que o condutor é capaz de perceber a aproximação do veículo da frente por meio da taxa de mudança do tamanho aparente deste veículo. Além disso, a velocidade relativa entre os dois é estimada pelo condutor em virtude da mudança do ângulo de visão do veículo líder. Esse tipo de CFM é também conhecido como modelo psico-físico ou de ponto de ação.

O modelo de Wiedemann considera quatro estágios de condução percebidos pelos motoristas: 1) condução livre; 2) aproximação; 3) perseguição; e 4) frenagem de emergência. Os estágios são diferenciados por seis curvas limítrofes de percepção humana, obtidas por meio de expressões matemáticas que consideram explicitamente erros de julgamento de espaçamento, velocidade e taxas de aceleração/desaceleração para o mesmo condutor ao longo do tempo, assim como entre diferentes condutores (Wiedemann e Reiter, 1992). Pesquisas sugerem que a estrutura básica deste modelo é capaz de representar de forma coerente o comportamento natural dos condutores (Brackstone e McDonald, 1999; Xin *et al.*, 2008).

Já o processo de aceitação de brecha no VISSIM pode ser modelado por meio do estabelecimento de regras de prioridade de passagem ou utilizando o conceito de áreas de conflito. Utilizando as regras de prioridade, o usuário define os movimentos com preferência de passagem, colocando faixas de retenção virtuais na via secundária e definindo uma brecha mínima para permitir a entrada na corrente de tráfego. Na opção de modelagem utilizando o conceito de áreas de conflito, o próprio aplicativo detecta essas áreas com base nos atributos geométricos da via. Na simulação, o condutor na via secundária avalia a brecha disponível e a situação além da área de conflito para então decidir pela aceitação ou não da brecha. Infelizmente, pouca informação está disponível sobre como o aplicativo lida com o processo. Vale ressaltar ainda que o VISSIM permite a utilização de modelos customizados por meio da sua ferramenta de programação VAP (*vehicle actuated programming*).

Quanto aos algoritmos de mudança de faixa, o VISSIM representa esse processo de forma hierárquica a partir das seguintes questões básicas: (1) Existe o desejo para mudar de faixa? (2) As condições do tráfego na faixa de destino são melhores do que na faixa atual? (3) A mudança de faixa é possível? A Figura 3 apresenta os parâmetros considerados pelo aplicativo VISSIM em seu algoritmo de mudança de faixa.

5. CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DOS MICROSIMULADORES

A confiabilidade do simulador de tráfego está intrinsecamente relacionada à sua capacidade de reproduzir, dentro de uma margem aceitável de erro, os indicadores operacionais que representam as condições do “mundo real”. De modo geral, o grau de confiabilidade de um modelo é verificado em duas etapas distintas, denominadas de calibração e validação. Na calibração, os parâmetros do modelo são sistematicamente alterados com o objetivo de minimizar a diferença entre uma medida de desempenho obtida em campo e o seu valor simulado. Na validação, por sua vez,

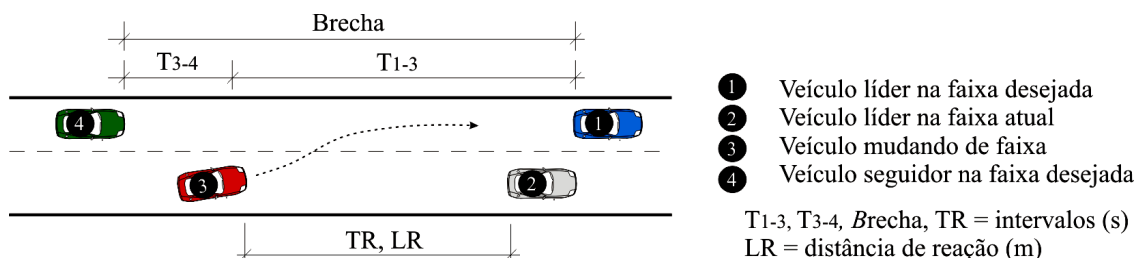


Figura 3. Parâmetros para mudança de faixa - VISSIM (Adap. Wiedemann e Reiter, 1992)

deve-se verificar a discrepância entre as medidas de desempenho estimadas utilizando os parâmetros calibrados com aquelas obtidas a partir de outra amostra dos dados observados em campo.

Normalmente, os esforços de calibração e validação de modelos de microssimulação encontrados na literatura utilizam medidas agregadas de desempenho operacional, tais como tempo médio de viagem, velocidade média, atraso médio, volume médio, etc. (Archer, 2005; Cunha e Setti, 2006; Maia e Loureiro, 2008). Entretanto, nas aplicações de segurança viária, a variável de interesse é um indicador *proxy* que é estimado a partir de expressões matemáticas que combinam parâmetros como diferença de velocidade e espaçamento veicular captados de forma desagregada. Consequentemente, calibrar e validar modelos de microssimulação para fins de análise da segurança do tráfego, utilizando medidas agregadas de desempenho operacional, pode não significar que os algoritmos de modelagem irão resultar em valores de indicadores *proxy* correspondentes aos que seriam observados em campo.

Cunto (2008) propôs uma metodologia de calibração/validação do microssimulador VISSIM utilizando um indicador *proxy* de segurança (o índice médio de potencial para acidentes - CPI) como medida de desempenho. A metodologia foi aplicada em uma via arterial com quatro semáforos atuados e coordenados, assim como em um trecho de 640 m de extensão da rodovia HWY101, ambos na Califórnia. Apesar dos resultados promissores obtidos com a aplicação desse tipo de metodologia, surgiram algumas questões relevantes, a saber:

- Indicadores *proxy* captados continuamente fornecem uma medida agregada da turbulência. Dessa forma, embora o sistema possa estar bem calibrado com base nesse indicador, não existe garantia de que o simulador reproduziu as mesmas interações no espaço e no tempo individualmente. Qual seria o nível ideal de agregação do indicador *proxy* nesse caso?
- Os valores dos parâmetros do microssimulador calibrados a partir do indicador *proxy* corresponderiam ao mesmo conjunto de valores caso fossem utilizadas medidas de desempenho tradicionais, como intervalo médio, velocidade média, tempo médio de viagem, etc?
- A rede simulada no referido estudo foi consideravelmente pequena, contemplando uma matriz OD controlada. Seria possível aplicar esse mesmo procedimento em uma rede maior e utilizando a medida *proxy* como única medida de desempenho?

6. VALIDAÇÃO DO DESEMPENHO DA SEGURANÇA VIÁRIA

Nos estudos de desempenho da segurança viária, além da preocupação em garantir que a plataforma de microssimulação está bem calibrada e validada, deve-se também verificar se a modelagem referente ao indicador *proxy* representa adequadamente a realidade dos conflitos no tráfego e, consequentemente, dos acidentes de trânsito. Portanto, o desempenho da segurança viária representado pelos indicadores *proxy* obtidos a partir da microssimulação requer uma confirmação objetiva baseada em comparações com outros estudos de segurança utilizando dados obtidos em campo. De acordo com Gettman e Head (2003), todavia, o indica-

dor simulado não precisa estar diretamente relacionado ao número de acidentes registrados em um determinado local. Contudo, a diferença relativa entre o desempenho de diferentes alternativas de intervenção viária deve ser consistente com estudos de segurança que produzam medidas de conflitos ou acidentes obtidos no “mundo real”.

Archer (2005) investigou a relação entre os indicadores TTC, TET e DRAC simulados usando o VISSIM e o indicador TTA obtido por meio da aplicação da técnica sueca de análise de conflitos de tráfego. Os resultados mostraram um nível razoável de consistência da frequência e da severidade estimadas pelas quatro medidas analisadas. As diferenças encontradas foram atribuídas à dificuldade dos algoritmos em replicar situações de risco observadas em campo.

Outra tentativa de validação do desempenho da segurança viária modelado microscopicamente foi apresentada por Cunto (2008). Utilizando dados de laços indutores instalados em uma rodovia canadense, as condições de fluxo e velocidade observadas cinco minutos antes de 27 colisões reportadas no banco de dados foram replicadas no microssimulador VISSIM. Para o mesmo horário de cada uma das 27 colisões, outros cinco minutos foram replicados, desta vez utilizando dados de fluxo e velocidade de um dia representativo “normal”, ou seja, sem a ocorrência de acidentes. O CPI médio foi calculado nas condições “normais” e de ocorrência de acidentes, com uma análise de variância confirmando que o CPI médio nas condições “normais” foi estatisticamente menor do que aquele obtido em condições de acidente. Desta forma, os resultados mostraram uma relação até certo ponto objetiva entre o aumento do CPI (turbulência) e a ocorrência de acidentes de trânsito.

Acredita-se que o avanço nas técnicas de aquisição de dados veiculares em tempo real, aliado à implementação de algoritmos de microssimulação mais adequados, levará ao desenvolvimento de estudos de desempenho da segurança mais eficientes no sentido de apresentar relações mais quantificáveis entre os indicadores *proxy* obtidos por meio da simulação e situações de risco observadas no mundo real.

7. CONCLUSÕES

Espera-se que as reflexões aqui propostas possam contribuir para uma melhor compreensão por parte da comunidade técnico-científica brasileira do potencial existente de utilização de plataformas de microssimulação em análises do desempenho da segurança viária, tanto no contexto urbano como no rodoviário. Embora a grande maioria dos microssimuladores atualmente disponíveis no mercado não tenha sido formalmente concebida para modelar a ocorrência de acidentes de trânsito, a simulação computacional das condições operacionais que geram conflitos no tráfego pode permitir a adoção de uma abordagem mais eficaz e pró-ativa, reduzindo a necessidade da observação em campo, por longos períodos de tempo, para a identificação e o diagnóstico de problemas de segurança viária.

Essa importante conclusão está embasada na análise conceitual aqui realizada dos indicadores de desempenho utilizados internacionalmente nas últimas cinco décadas, na qual se constata que problemas relacionados à qualidade dos dados de acidentes disponíveis, além de questões metodológicas associadas à natureza rara e randômica desse tipo de evento, vêm incentivando o desenvolvimento de pesqui-

sas com indicadores *proxy* que caracterizem as condições de conflito que precedem a ocorrência dos acidentes. Esse tipo de indicador procura representar de forma contínua a interação espaço-temporal entre veículos, o que torna o ambiente da microssimulação propício à obtenção de maneira eficiente e barata, além de em um nível suficientemente desagregado, das informações necessárias à sua determinação.

Vale reforçar, entretanto, que a confiabilidade nos valores dos indicadores de desempenho da segurança viária, determinados a partir de modelos microscópicos do tráfego veicular, depende essencialmente não só de quão bem calibrados e validados estejam esses modelos, como também da capacidade do indicador de representar adequadamente o contexto real das interações e conflitos veiculares que levam aos acidentes. Portanto, abrem-se inúmeras oportunidades e desafios de pesquisa nessa área, considerando, dentre outros, as formas de representação dos conflitos/interações no tráfego, as simplificações inerentes aos algoritmos de modelagem microscópica, os procedimentos de calibração e validação desses algoritmos, assim como a validade relativa dos indicadores de desempenho para refletirem o contexto real da segurança viária.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Archer, J. (2005) *Methods for the assessment and prediction of traffic safety at urban intersection and their application in micro-simulation modelling*. Tese (doutorado), Department of Infrastructure. Royal Institute of Technology, Sweden.
- Barceló, J.; A. Dumont; L. Montero; J. Perarnau e A. Torday (2003) Safety indicators for microsimulation-based assessments. *Proceedings of the 82nd Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington, D.C., USA.
- Brackstone, M. e M. McDonald (1999) Car-following: a historical review. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*. National Research Council, Washington, D.C., v. 2, p. 181–196.
- Cooper, D.F. e N. Ferguson (1976) A conflict simulation model. *Traffic Engineering and Control*. London. UK, p. 306–309.
- Cunha, A. B. L. N. e J. R. Setti (2006) Calibração do modelo de desempenho de caminhões do CORSIM através de um algoritmo genético. *Anais do XX Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, ANPET, Rio de Janeiro, v. 1. p. 88–99.
- Cunto, F.J.C. (2008) *Assessing Safety Performance of Transportation Systems using Microscopic Simulation* Tese de Doutorado, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Waterloo, Ontário, Canadá.
- Davis, G.A. (2004) Possible Aggregation Biases in Road Safety Research and a Mechanism Approach to Accident Modeling. *Accident Analysis and Prevention*, v. 36, p. 1119–1127.
- Gettman, D. e L. Head (2003) *Surrogate safety measures from traffic simulation models*. Federal Highway Administration report RD-03-050. McLean, VA, USA.
- Hauer, E. (2002) *Observational Before-after Studies in Road Safety*. (1^a ed.). Pergamon.
- Hauer, E. e A. S. Hakkert (1989) The extent and implications of incomplete accident reporting. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, n. 1185, TRB, National Research Council, Washington, D.C., p. 1–10.
- Hayward, J. (1972) Near miss determination through the use of a scale of danger. Report No. TTSC 7715, Pennsylvania State University, Pennsylvania.
- Hoban, C.J.; G. C. Fawcett e G. K. Robinson (1985) *A model for simulating traffic on two-lane rural roads: user guide and manual for TRARR Version 3.0*. Australian Road Research, Technical Manual.
- Hydén, C. (1987) *The development of a method for traffic safety evaluation: The Swedish traffic conflicts technique*. Bulletin 70. Department of Traffic Planning and Engineering, Lund University, Lund, Sweden.
- Hydén, C. (1996) *Traffic safety work with video-processing*. Technical report, Transportation. Department, University Kaiserslautern.
- Maia, F.V.B e C. F. G. Loureiro (2008) Procedimento Sistemático para Simulação do Tráfego Veicular em Modelos Mesoscópicos e Microscópicos. *Anais do XXII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, ANPET, Fortaleza, p. 589–600.
- McDowell, M.R.C.; J. Wennell; P. A. Storr e J. Darzentas (1983) *Gap acceptance and traffic conflict simulation as a measure of risk*. Technical Report, Transportation and Road Research Laboratory - Supplementary Report 776.
- Minderhoud, M. e P. Bovy (2001) Extended time to collision measures for road traffic safety assessment. *Accident Analysis and Prevention*, v. 33, p. 89–97.
- Perkins, S. e J. Harris (1968) *Criteria for traffic conflict characteristics*. Report GMR 632. Technical Report, General Motors Corporation.
- Pietrantônio, H. (1999) Avaliação da Técnica Sueca de Análise de Conflitos de Tráfego - Aplicação ao Estudo de Problemas de Segurança de Pedestres em Interseções Semaforizadas da Cidade de São Paulo. *Relatório de Trabalho*. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.
- Robles, D.G. e A. A. Raia Jr (2008) Correlação entre Conflitos e Acidentes usando a Técnica Sueca de Análise de Conflitos de Tráfego. *Anais do XXII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, ANPET, Fortaleza, p. 952–963.
- St. John, A.D. e D. W. Harwood (1986). *TWOPAS User's Guide*, A User's Guide to TWOPAS - A Microscopic Computer Simulation Model of Traffic on Two-Lane, Two-Way Highways. Performing Organization Report n. 7533-S(6), Washington, DC: Federal Highway Administration.
- Wiedemann, R. (1974) *Simulation of road traffic flow*. Reports of the Institute for transport and communication. v. 8, University of Karlsruhe, Alemanha.
- Wiedemann, R. e U. Reiter (1992) Microscopic traffic simulation: the simulation system MISSION, background and actual state, CEC Project ICARUS (V1052) Final Report, v. 2, Appendix A. Brussels: CEC, Bruxelas, Bélgica.
- Xin, W.; J. Houdos; P. Michalopoulos G. Davis (2008) The less-than-perfect driver: a model of collision-inclusive car-following behavior. *Proceedings of the 87th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington D.C., USA.