

ARTIGO

DETERMINAÇÃO DA CAPACIDADE E NÍVEL DE SERVIÇO EM INTERSEÇÕES RODOVIÁRIAS ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO

Sergio Henrique Demarchi

José Reynaldo A. Setti

Universidade de São Paulo

Escola de Engenharia de São Carlos

RESUMO

Este trabalho descreve o uso de um simulador na análise do impacto de veículos pesados na capacidade e no nível de serviço de interseções rodoviárias não semaforizadas. O impacto na capacidade é medido através da determinação de fatores de equivalência veicular, enquanto que a avaliação do nível de serviço da interseção baseia-se nos tempos médios de espera dos veículos durante as manobras de cruzamento. Os resultados obtidos mostram que os veículos que causam maior impacto na operação das interseções são os caminhões articulados, devido ao seu comprimento, e os caminhões médios, devido a sua menor relação potência/peso. Os fatores de equivalência obtidos são, em geral, maiores que equivalentes veiculares adotados pelo HCM de 1994, mostrando a necessidade de se desenvolver um método para análise de interseções não semaforizadas mais adequado às condições nacionais.

ABSTRACT

This paper describes the use of a simulator to analyse heavy vehicle impacts on capacity and level of service of rural unsignalized

intersections. The impact on capacity is measured by the determination of equivalence factors and the level of service assessment is based on average delay crossing times. The results indicate that the two vehicle classes responsible for the greatest impact are articulated trucks (due to their length) and medium-sized trucks, because of their poor power-to-weight ratio. The equivalence factors obtained are greater than those shown in the 1994 HCM, demonstrating the need for development of an unsignalized intersection analysis method more adequate to the Brazilian operational and vehicle conditions.

1. INTRODUÇÃO

Interseções em nível não semaforizadas são elementos geométricos cuja função é promover o cruzamento entre duas rodovias de pista simples. Elas constituem uma alternativa mais simples e menos onerosa que a implantação de interseções em desnível, gerando porém conflitos entre fluxos distintos de tráfego, o que torna necessária a priorização dos movimentos na interseção. A prioridade dos fluxos de tráfego é definida através da utilização de placas do tipo "PARE" ou "DÊ A PREFERÊNCIA", obrigando os motoristas dos veículos do fluxo não prioritário, na via secundária, a decidir quando realizar as manobras de cruzamento, utilizando para isso os intervalos existentes entre os veículos do fluxo prioritário, que trafegam pela via principal. Tais intervalos são denominados *gaps*.

A escolha e a aceitação de *gaps* varia em função do motorista, do veículo e da duração dos *gaps* na via principal. Os caminhões cruzam a interseção em tempo maior e necessitam de *gaps* de maior duração que os aceitos pelos automóveis, pois possuem maior comprimento, maior peso e, em alguns casos, menor relação potência/peso. Se a via principal possui um fluxo elevado de tráfego, com veículos trafegando em altas velocidades e se existe um grande número de caminhões cruzando a interseção, o cruzamento pode tornar-se demorado ou mesmo perigoso, reduzindo a capacidade e a qualidade de operação da interseção, na medida em que os tempos de espera e o comprimento da filas tendem a aumentar.

A adoção de caminhões articulados para o transporte de carga, tendência observada já há vários anos em países da Europa e nos Estados Unidos e que nos últimos anos vem sendo presenciada também no Brasil, tem como meta principal a redução dos custos unitários de transporte. Um dos melhores exemplos dessa tendência é encontrado no setores canavieiro e madeireiro, que utilizam composições rodoviárias de duas ou três unidades para o transporte da cana. Esses veículos, com comprimentos de até 30 m e com um peso bruto total combinado que pode atingir as 74 toneladas, provocam impactos consideráveis na operação de rodovias, particularmente em rampas ascendentes e em interseções em nível. Mesmo caminhões unitários, mais leves que os extra-pesados, provocam impactos, pois parte da frota desses veículos possui baixa relação potência/peso, reflexo de suas condições operacionais características, ou seja, sobrecarga, idade avançada e péssimo estado de conservação.

O objetivo deste trabalho é avaliar a influência de caminhões e ônibus na capacidade e no nível de serviço das interseções rodoviárias não semaforizadas. O impacto na capacidade é medido através da determinação de fatores de equivalência veicular para diferentes categorias de veículo pesados, enquanto que o nível de serviço da interseção é determinado em função dos tempos médios de espera dos veículos durante as manobras de cruzamento, associados ao critério proposto pelo *Highway Capacity Manual - HCM* [TRB, 1994].

2. FATOR DE EQUIVALÊNCIA VEICULAR

A equivalência veicular é um conceito utilizado nos métodos de determinação de capacidades de interseções, onde veículos de diferentes categorias são convertidos em uma categoria padrão. O veículo padrão, que corresponde em termos práticos ao automóvel, é denominado *veículo de passeio equivalente (vpe)*, termo que foi adaptado do inglês *passenger car equivalent (pce)*.

O HCM [TRB, 1994] considera quatro categorias de veículos na determinação da capacidade de interseções em nível: motos, automóveis,

caminhões rígidos e caminhões combinados. Não são fornecidos maiores detalhes sobre os critérios envolvidos na determinação de tais fatores e não são fornecidos fatores específicos para caminhões articulados como o caminhão+reboque e o treminhão. Tais aspectos, bem como as diferenças existentes entre os veículos, motoristas, projeto geométrico e operação de interseções, justificam a necessidade de se determinar fatores de equivalência mais adequados às condições nacionais.

O método utilizado neste trabalho supõe que o fator de equivalência corresponde ao número de veículos de passeio equivalentes que seriam capazes de cruzar uma interseção durante o tempo que um veículo pesado utiliza na execução da manobra, ou seja, desde sua chegada até o término do cruzamento. A Figura 1 ilustra tal conceito, tomando como exemplo o cruzamento de um caminhão semi-reboque que rejeitou inicialmente um lag l_1 e um gap g_1 (lags são a porção remanescente de um gap , ou seja, quando o veículo da via secundária chega à interseção durante a ocorrência de um gap). Supondo que o gap g_1 rejeitado pelo caminhão, fosse suficiente para que dois automóveis cruzassem a interseção e que um outro automóvel fosse capaz de cruzar a via durante o lag l_1 , três automóveis seriam capazes de efetuar o cruzamento durante o tempo que o caminhão espera para cruzar a via preferencial.

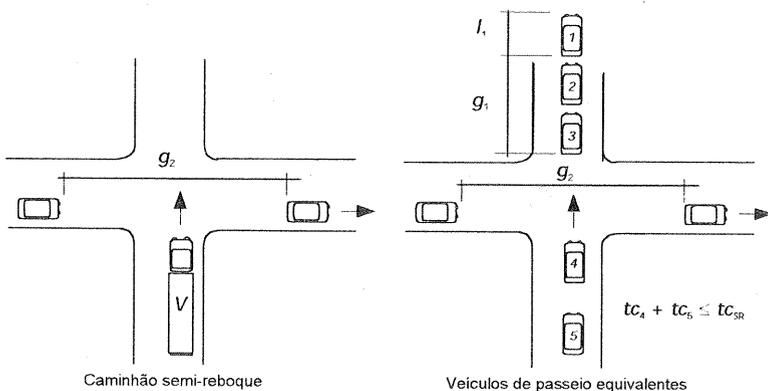


Figura 1
Determinação do fator de equivalência veicular

Supondo que o semi-reboque aceita um segundo gap g_2 e gasta um tempo tc_{SR} para cruzar a via principal e que dois automóveis seriam capazes de cruzar a interseção no intervalo de tempo tc_{SR} , o fator de equivalência para este caminhão seria igual a $3 + 2 = 5$ veículos de passeio equivalentes. Neste caso, apenas uma fração do gap g_2 (tc_{SR}) é considerada na determinação do fator de equivalência, pois o restante do gap ($g_2 - tc_{SR}$) seria usado por outros veículos. São, dessa forma, considerados como veículos de passeio equivalentes somente os veículos que cruzam a interseção com um tempo menor ou igual ao tempo de cruzamento do caminhão semi-reboque, o que nesse caso equivale a dizer que $tc_4 + tc_5 \leq tc_{SR}$.

3. ESPERA VEICULAR E NÍVEL DE SERVIÇO

A qualidade de operação de uma interseção em nível não semaforizada está diretamente relacionada ao tempo de espera a que estão sujeitos os veículos da via secundária durante as manobras de cruzamento. A espera é função da intensidade e velocidade do tráfego na via principal, fluxo na via secundária, número de caminhões realizando manobras de cruzamento e condições de visibilidade existentes na interseção.

A espera média de um veículo em uma interseção é definida pelo HCM [TRB, 1994] como o intervalo de tempo compreendido entre o instante de sua chegada até o instante em que o veículo inicia a manobra de cruzamento. Caso já exista uma fila de veículos na interseção, o instante de chegada corresponde ao momento em que o veículo junta-se ao final da fila; caso contrário, ele corresponde ao instante em que o veículo posiciona-se na linha de parada da interseção e decide se deve ou não realizar o cruzamento.

O nível de serviço é uma medida qualitativa da operação de interseção e reflete, de certa forma, o nível de satisfação dos motoristas que realizam manobras de cruzamento. Sua determinação é feita em função de um parâmetro mensurável que caracteriza a operação da interseção. Esse parâmetro é definido como *medida de desempenho* [TRB, 1994].

Nível de Serviço	tempo médio de espera T
A	$T \leq 5$ seg/veíc.
B	$5 < T \leq 10$ seg/veíc.
C	$10 < T \leq 20$ seg/veíc.
D	$20 < T \leq 30$ seg/veíc.
E	$30 < T \leq 45$ seg/veíc.
F	$T > 45$ seg/veíc.

Tabela 1

Critério de nível de serviço baseado na espera média [TRB, 1994; cap. 10]

O HCM adota como medida de desempenho de uma interseção não semaforizada o tempo médio de espera, conforme mostra a Tabela 1. O tempo médio de espera para um determinado tipo de movimento (cruzamento ou conversões) é função da capacidade, da taxa de serviço e do grau de saturação da interseção para o movimento considerado, podendo ser calculada através de uma equação ou determinada graficamente.

4. MÉTODO UTILIZADO

Este trabalho utiliza um modelo de simulação para representar a operação das interseções em nível. Basicamente são quatro as variáveis que definem o modelo:

- composição do tráfego que cruza a via principal;
- distribuição de gaps na via principal;
- distribuição dos gaps e lags aceitos para cada categoria de veículo;
- distribuição dos tempos de cruzamento para cada categoria de veículo.

Cada variável é representada, por sua vez, através de modelos matemáticos incorporados ao simulador. Tais modelos foram calibrados e validados utilizando dados coletados em interseções em nível, através do processo de coleta descrito no item 4.1. Uma descrição detalhada do modelo de simulação é feita no item 4.2.

4.1. Coleta de Dados

As coletas de dados foram realizadas em duas interseções localizadas na região de Ribeirão Preto, no norte do estado de São Paulo. Ambas são cruzamentos de rodovias de pistas simples, com dois sentidos de tráfego, apresentando canalizações para conversões e acessos que separam os fluxos de sentidos contrários nos cruzamentos, conforme mostra a Figura 2. Foram analisados 1114 cruzamentos nos dois acessos de cada uma das interseções.

A primeira interseção analisada (*Pradla*) localiza-se no cruzamento das rodovias SP 255 (via principal) e SP 253 (via secundária), em uma curva vertical côncava, apresentando boas condições de visibilidade. A segunda interseção, *Bonfim*, constitui o acesso à uma usina sucroalcooleira pela rodovia SP 326 (via principal). Esta interseção localiza-se no topo de uma curva vertical convexa da rodovia SP 326, e as condições de visibilidade são inferiores às existentes na interseção *Pradla*.

Para a coleta de dados, foram definidas categorias veiculares em função do peso bruto total combinado (PBTC), dimensões e número de unidades dos veículos. A classificação baseou-se na classificação proposta pela AASHTO [1990], com algumas modificações de maneira à adaptar-se às características dos veículos nacionais:

- *Automóvel*: veículo de no máximo dois eixos, destinado ao transporte de passageiros e carga em pequenas quantidades, incluindo automóveis comuns, caminhonetes e furgões.
- *Ônibus*: veículo para transporte de passageiros em maior quantidade.
- *Caminhão leve*: veículo de carga rígido com apenas dois eixos e $PBTC \leq 15$ t.
- *Caminhão médio*: caminhão unitário com 3 eixos e PBTC entre 15 e 23 t.

- *Caminhão pesado semi-reboque*: veículo de carga composto por cavalo mecânico e um semi-reboque, com 5 ou 6 eixos e PBTC entre 23 e 45 t.
- *Caminhão pesado + reboque* (“romeu-e-julieta”): caminhão rígido com três eixos e um reboque com 2 eixos, comprimento total de 19,80 m e PBTC ≤ 43 t.
- *Caminhão extra-pesado tipo treminhão*: caminhão rígido com três eixos e dois reboques de 2 eixos, comprimento máximo de 30,00 m, e PBTC ≤ 63 t.

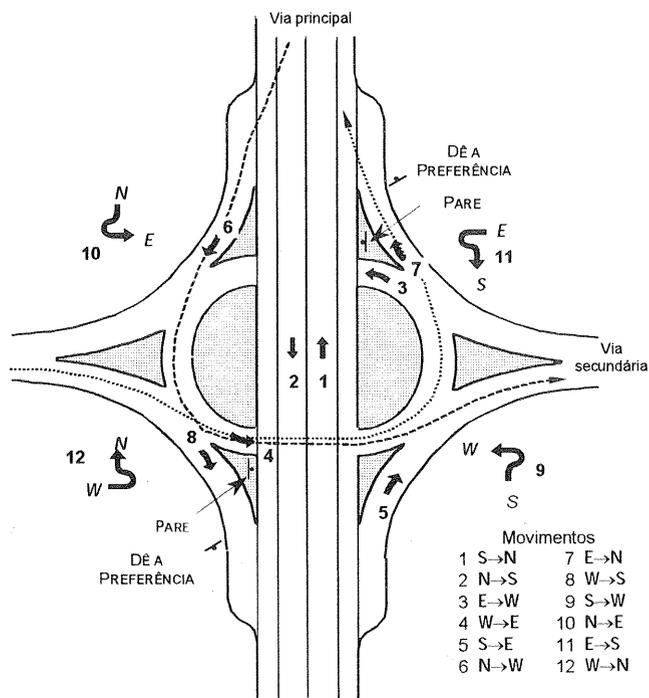


Figura 2
Layout típico das interseções analisadas

Os dados foram coletados através de câmeras de vídeo [MASON *et al.*, 1990; FITZPATRICK, 1991]. Este método de coleta tem duas fases: filmagem da interseção e redução dos dados. A filmagem é feita com uma ou duas câmeras, fixadas em tripés, em pontos da interseção que permitam captar

todos os movimentos dos veículos das vias principal e secundária. Os instantes de passagem dos veículos por linhas de referência adotadas na interseção, conforme mostra a Figura 3, são obtidos através de um relógio interno da filmadora.

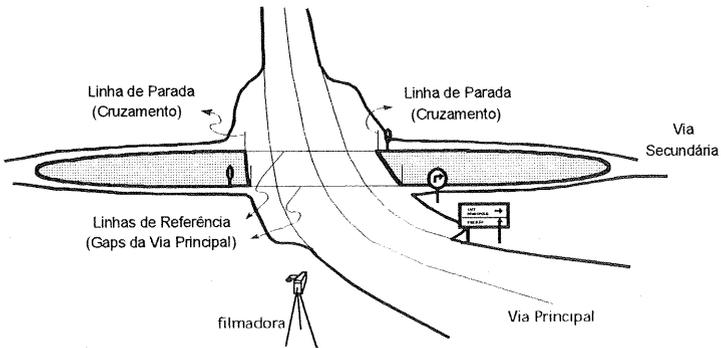


Figura 3
Linhas de referência utilizadas na redução de dados

A redução de dados utiliza uma máscara, colocada sobre a tela de um televisor, que reproduz os contornos e pontos de referência. A gravação é observada, quadro a quadro quando necessário, sendo coletados os instantes de passagem dos veículos pelas linhas de referência. Os dados levantados dos videotapes incluem tempos de cruzamento, gaps na via principal, gaps e lags aceitos e rejeitados pelos veículos, e volumes de tráfego classificados tanto por tipo de veículo como por tipo de movimento.

4.2. Estrutura do Simulador

O simulador foi desenvolvido utilizando-se o pacote de simulação GPSS/H (*General Purpose Simulation System*), capaz de simular eventos discretos, tais como a chegada de veículos à interseção, bem como a tomada de decisão dos veículos em função da sequência de gaps e lags na via principal. Ele consiste de dois módulos, um para determinação da

equivalência veicular e outro para determinação das medidas de desempenho da interseção.

No primeiro módulo, o simulador varia o fluxo da via principal e determina para cada condição os fatores de equivalência das categorias veiculares consideradas, sendo que o número máximo de veículos que consegue cruzar a interseção no intervalo de uma hora representa a capacidade de cruzamentos da interseção. No segundo módulo, o simulador varia tanto o fluxo da via principal como da via secundária, determinando para cada situação específica os tempos médios de espera e as porcentagens de utilização da interseção, ou seja, a porcentagem de tempo da simulação em que existem veículos esperando pelo surgimento de um gap de tamanho adequado ou realizando manobras de cruzamento.

O simulador foi elaborado de forma a representar isoladamente a operação de cada um dos acessos de uma interseção canalizada, supondo apenas a existência de cruzamentos e conflitos entre os fluxos de veículos da via principal e da via secundária. Não foram considerados os conflitos entre veículos da via secundária, gerados durante manobras de conversão à esquerda.

Embora os resultados apresentados neste trabalho sejam específicos às interseções Pradla e Bonfim, outras interseções possam ser simuladas com o uso deste modelo, bastando para isso que os parâmetros relativos aos modelos de aceitação de gaps e da distribuição de tempos de cruzamento sejam modificados de acordo com a interseção considerada.

De um modo geral, o simulador consiste das etapas descritas a seguir e ilustradas na Figura 4:

1. Geração de veículos na via secundária;
2. Determinação da categoria V do veículo da via secundária;
3. Cálculo do gap mínimo G_c através de modelos Logit;

Para satisfazer tal condição, o simulador considera que o instante de chegada de um veículo à interseção coincide com o instante de término de cruzamento do veículo antecedente. No módulo 2, o simulador considera que os intervalos h entre chegadas de veículos sucessivos são distribuídos exponencialmente (vide Figura 4). Assim, variando-se o fluxo médio de chegada, podem ser obtidos as medidas de desempenho da interseção (tempos médios de espera e porcentagem de utilização da interseção).

4.2.2. Composição do Tráfego na Via Secundária

O tipo de veículo que chega à via secundária é definido através de uma função determinística, com porcentagens acumuladas associadas à cada uma das categorias de veículos analisadas. Essas porcentagens são definidas de acordo com a composição do tráfego de veículos verificados em cada acesso da interseção, conforme mostrado na Tabela 2. O simulador gera então um número aleatório P_i , que define, através da função de porcentagens acumuladas (vide Figura 4), o veículo da categoria V que cruza a interseção.

Categoria Veicular	Pradla	Bonfim
Automóvel	20%	27%
Caminhão Leve	4%	3%
Caminhão Médio	36%	38%
Ônibus	12%	6%
Caminhão Semi-reboque	17%	3%
Caminhão+Reboque (carregado)	6%	16%
Treminhão (carregado)	5%	7%

Tabela 2
Composição do tráfego observado nos acessos das interseções

O simulador é capaz de diferenciar caminhões canavieiros do tipo caminhão+reboque e treminhão vazios e carregados, pois foi observado durante a coleta de dados que veículos vazios e carregados trafegam

sempre em acessos diferentes e em sentidos contrários. Foram simulados neste trabalho somente os acessos por onde trafegavam veículos tipo caminhão+reboque e treminhão carregados.

4.2.3. Aceitação de Gaps nos Cruzamentos

A probabilidade de aceitação de um dado gap ou lag de duração g , é determinada através de modelos Logit para cada categoria de veículo. O simulador supõe que um veículo aceita cruzar a via durante um gap g se este gap (ou lag) for maior que valor mínimo G_c .

Para cada interseção foi definido um conjunto de modelos Logit, pois as características de aceitação de gaps variam de uma interseção para a outra. O gap ou lag mínimo G_c de um veículo prestes a cruzar a via principal é determinado através da geração de um número aleatório (probabilidade P_2), usando-se a transformação inversa do modelo Logit:

$$G_c = \frac{1}{\beta_1} \left[\ln \left(\frac{P_2}{1-P_2} \right) - \beta_0 \right] \quad (1)$$

Os parâmetros b_0 e b_1 foram calibrados através de máxima verossimilhança, permitindo tanto o uso de gaps aceitos como rejeitados na calibração. O modelo não é influenciado pelo uso de gaps aceitos de longa duração, como ocorre com as funções cumulativas de frequência de gaps aceitos. Maiores detalhes sobre a calibração dos modelos Logit utilizando máxima verossimilhança podem ser encontrados em SETTI & DEMARCHI [1996].

4.2.4. Tempos de Cruzamento

Os tempos de cruzamento são associados a frequências relativas acumuladas através de funções distribuição logísticas. A simulação pressupõe duas situações distintas: a) o veículo chega à interseção e aceita imediatamente um lag, realizando uma manobra de cruzamento sem parada; b) o veículo rejeitou pelo menos um lag e pode ter rejeitado um ou mais gaps, iniciando o cruzamento com velocidade zero. A

simulação distingue entre as duas situações e, em função disso e da categoria do veículo, o simulador determina o tempo de cruzamento T através da transformação inversa da função distribuição logística:

$$T_c = \frac{1}{\beta_1} \left[\ln \left(\frac{P_2}{1 - P_2} \right) - \beta_0 \right] \quad (2)$$

Os parâmetros b_0 e b_1 são obtidos através de regressão linear simples, para cada categoria veicular e para cada situação. Os tempos de cruzamento são calculados em função do mesmo número aleatório P_2 utilizado na determinação do gap mínimo do veículo. Esta suposição é razoável, pois para probabilidades menores correspondem menores valores de gaps e, conseqüentemente, menores tempos de cruzamento.

4.2.5. Distribuição de Gaps na Via Principal

A distribuição de gaps na via principal é representada através de uma distribuição exponencial composta, capaz de representar gaps entre veículos trafegando em pelotões e entre pelotões de veículos. Supondo-se que nenhum veículo cruza a via principal entre dois veículos que viajam num pelotão, pode-se adotar um valor g_p que representa o maior gap entre veículos viajando num pelotão na via principal. O valor adotado para g_p é de 4 segundos e corresponde ao menor lag aceito por um automóvel, conforme observado durante a coleta de dados.

A distribuição exponencial composta é formada por duas funções distintas. A primeira, usada para representar a distribuição dos gaps maiores que g_p , onde fluxo de tráfego é livre (não-pelotizado), é uma distribuição exponencial. A segunda, usada para representar a distribuição de gaps entre veículos viajando em pelotões (gaps menores que g_p), é uma distribuição linear.

O simulador gera um número aleatório P_3 para o cálculo do gap disponível na via principal (vide Figura 4). O cálculo de g utiliza a função transformada inversa do modelo exponencial ou a função transformada inversa do modelo linear, em função da probabilidade do

gap sendo gerado corresponder ao intervalo entre dois veículos de um mesmo pelotão ou não:

$$g = \begin{cases} \ln\left(\frac{1-P_3}{1-p}\right)(g_p - \bar{g}_i) + g_p, & \text{se } P_3 \geq p \\ \frac{1}{b}\left(\frac{P_3}{p} - a\right), & \text{se } P_3 < p \end{cases} \quad (3)$$

onde:

p : probabilidade de ocorrência de g_p . É a parcela dos veículos que trafegam em pelotões;

\bar{g}_i : média dos gaps para veículos com fluxo livre (s);

a, b : parâmetros da função linear.

4.2.6. Tomada de Decisão

A tomada de decisão no cruzamento é reproduzida na simulação comparando-se o gap mínimo G_c do veículo que deseja cruzar a interseção com o gap g disponível na via principal. O veículo aceita o gap disponível se $g > G_c$ e “ocupa” a interseção durante o tempo de cruzamento T_c determinado anteriormente pelo simulador. Caso contrário, o gap é rejeitado e um novo gap é gerado pela simulação, até que um gap seja aceito pelo veículo que cruza a interseção.

4.2.7. Determinação dos Fatores de Equivalência e Capacidade da Interseção

Quando ocorre a rejeição de um gap ou lag por um veículo, o módulo 1 do simulador repete o mesmo processo para um veículo de passeio equivalente, ou seja, determina um gap mínimo g_c um tempo de cruzamento t_c e verifica se o gap ou lag rejeitado pelo veículo genérico é aceito pelo veículo equivalente (tal processo não é necessário se o veículo for um automóvel). Um segundo veículo equivalente é gerado então pelo simulador no mesmo instante em que o primeiro veículo à sua frente termina o cruzamento e aceita o lag, ou seja, o restante do gap ou lag aceito pelo primeiro veículo equivalente, o mesmo ocorrendo com

todos os veículos subsequentes para os quais for satisfeita a seguinte condição:

$$g_{ci} \leq g - \sum_{i=1}^m t_{ci-1} \quad (4)$$

onde:

g_{ci} : lag mínimo do i -ésimo veículo equivalente que aceita o mesmo gap ou lag que o primeiro veículo

m : número de veículos subsequentes ao primeiro que aceitam o mesmo gap ou lag

t_{ci-1} : tempo de cruzamento do veículo imediatamente anterior ao i -ésimo veículo equivalente

O tempo de cruzamento t_c do veículo $i - 1$ representa, na verdade, o tempo necessário para o segundo veículo que cruza a via chegar ao ponto de início do cruzamento ("move-up time"). Esta suposição é suportada pelas observações no campo, que indicam que um dado veículo espera o veículo que está à sua frente terminar o cruzamento para iniciar a sua manobra.

Quando surge um gap (ou lag) que permite que o veículo cruze a via preferencial, o simulador verifica qual o número de veículos de passeio equivalentes que podem cruzar a via principal durante um gap (ou lag) de mesma duração que o usado pelo veículo genérico.

Assim que um veículo cruza a interseção, o simulador incrementa o contador de veículos que corresponde àquela categoria. O simulador também adiciona ao contador correspondente ao tipo do veículo o número de veículos de passeio equivalentes obtido para a manobra em questão. Ao final da simulação, têm-se n_k , o total de veículos de uma categoria k que cruzaram a interseção, e vpe_k , o total de veículos de passeio equivalentes correspondentes à categoria k . O fator de equivalência Feq_k dos veículos do tipo k pode ser calculado pela expressão:

$$Feq_k = \frac{vpe_k}{n_k} \quad (5)$$

A capacidade de cruzamentos C de cada acesso da interseção, expressa em veículos genéricos/hora (vph) pode então ser calculada por:

$$C = \frac{\sum n_k}{h_s} \quad (6)$$

onde h_s corresponde ao total de horas simuladas. A capacidade pode ainda ser expressa em veículos de passeio equivalentes, de acordo com a seguinte expressão:

$$C = \frac{\sum vpe_k}{h_s} \quad (7)$$

4.2.8. Medidas de Desempenho da Interseção

O módulo 2 do simulador coleta os tempos de espera em fila dos veículos que cruzam a interseção, utilizando recursos internos ao próprio GPSS/H. No final da simulação são obtidos os tempos médios de espera para a situação simulada, além das porcentagens de utilização da interseção. Os valores obtidos para cada situação podem então ser plotados em superfícies de espera, em função dos fluxos de tráfego das vias principal e secundária.

5. RESULTADOS

Dado o caráter aleatório das simulações estocásticas, a simulação de cada acesso no módulo 1 foi replicada 10 vezes, sendo cada replicação equivalente a um período de 100 horas de operação das interseções. Para cada replicação foram utilizadas sequências de números aleatórios diferentes, sendo obtidos assim capacidades da via secundária e fatores de equivalência veiculares em função do fluxo da via principal, variando entre 50 e 700 vph.

No módulo 2, foram realizadas 10 replicações de 101 horas cada para cada condição operacional das interseções, ou seja, fluxo na via principal

variando entre 50 e 700 vph e fluxo na via secundária variando entre 50 e 400 vph. Na primeira hora de cada simulação nenhuma medida de desempenho foi coletada, eliminando assim uma possível tendência nos resultados médios devido à coleta de estatísticas em uma situação onde não existe fila de veículos na via secundária, situação esta que seria distinta da condição normal de operação da interseção. Nas 100 horas restantes, foram coletados os tempos médios de espera e a porcentagem de utilização da interseção.

Os resultados apresentados a seguir correspondem às médias dos resultados obtidos nas replicações.

5.1. Equivalência Veicular

As Figuras 5 e 6 mostram os fatores de equivalência veicular em função do fluxo de tráfego da via principal, para as interseções Pradla e Bonfim, respectivamente, enquanto que a faixa de variação dos fatores de equivalência é apresentada na Tabela 3. Observa-se que na interseção Pradla a variação dos equivalentes veiculares não é muito significativa para caminhões do tipo leve, médio, semi-reboque e para os ônibus. A variação dos fatores de equivalência do caminhão+reboque e do treminhão, entretanto, é mais acentuada.

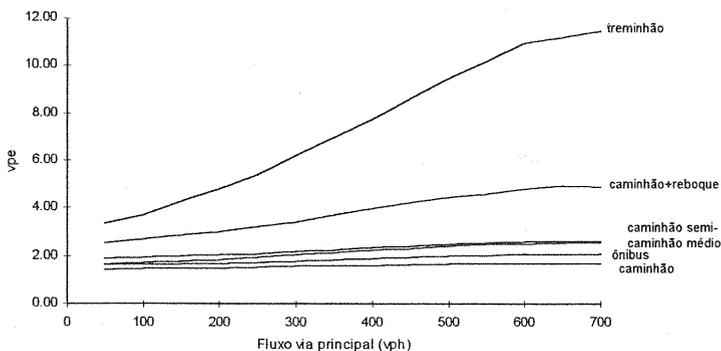


Figura 5
Fatores de equivalência - interseção Pradla

Na interseção Bonfim a variação dos fatores de equivalência não é muito significativa somente para veículos das categorias caminhão-leve, ônibus e caminhão semi-reboque. A variação é maior para o caminhão médio, caminhão+reboque e treminhão. Nesta interseção foi observado um número maior de caminhões médios transportando cana do que na interseção Pradla, o que justifica, de certa forma, o aumento do fator de equivalência desses tipos de veículos. De fato, caminhões médios que carregam cana normalmente apresentam uma relação potência/peso menor, pois são veículos velhos, mal conservados e normalmente trafegam sobrecarregados.

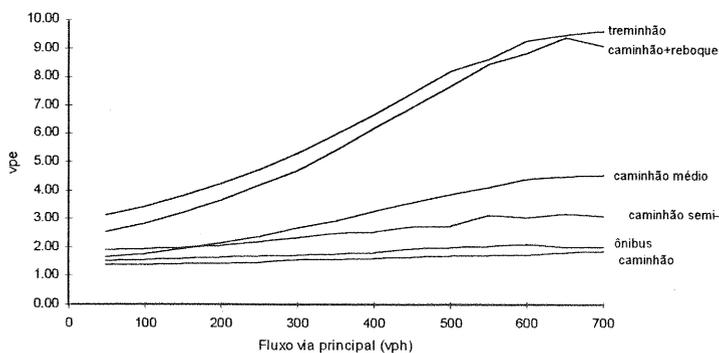


Figura 6
Fatores de equivalência - interseção Bonfim

A Tabela 3 ainda compara os equivalentes veiculares obtidos através de simulação com os valores fornecidos pelo HCM [TRB, 1994]. O manual americano fornece fatores de equivalência para veículos rígidos (caminhões e ônibus) e veículos articulados (caminhões semi-reboque). Os valores são constantes, independentes do fluxo de tráfego na via principal e, em geral, são menores que os valores obtidos por simulação para os veículos nacionais, cuja relação potência/peso é, em geral, menor que a dos caminhões típicos norte-americanos.

Um detalhe importante a ser observado é que os fatores obtidos para os caminhões médios típicos são próximos ou maiores que os fatores de

equivalência dos caminhões semi-reboques, embora estes sejam mais longos e mais pesados. Esse resultado reflete as condições de operação dos caminhões médios, cuja relação potência/peso é menor que a dos semi-reboques, em função de trabalharem rotineiramente sobrecarregados e possuem idade média maior.

Categoria Veicular	Fatores de equivalência obtidos na simulação		Equivalentes veiculares
	Pradla	Bonfim	HCM [TRB, 1994]
Automóvel	1,00	1,00	1,00
Caminhão Leve	1,45 - 1,69	1,39 - 1,87	1,50
Caminhão Médio	1,64 - 2,56	1,64 - 4,55	1,50
Ônibus	1,61 - 2,06	1,54 - 2,11	1,50
Caminhão Semi-reboque	1,88 - 2,62	1,89 - 3,17	2,00
Caminhão+Reboque (carregado)	2,52 - 4,94	2,54 - 9,35	-*
Treminhão (carregado)	3,35 - 11,42	3,13 - 9,59	-*

* O HCM não fornece fatores de equivalência para tal categoria de veículo

Tabela 3
Variação dos fatores de equivalência

5.2. Capacidade da Via Secundária

As Figuras 7 e 8 apresentam a relação entre a capacidade de cruzamentos de veículos na via secundária em função do volume de tráfego na via principal, respectivamente para as interseções Pradla e Bonfim. Os valores são expressos tanto em volume horário de veículos genéricos (vph) bem como em veículos de passeio equivalentes (vpe). As figuras 7 e 8 ainda mostram que os valores de capacidade expressos em vpe são bastante próximos aos obtidos através do uso da fórmula de Sieglösch, que constitui a base para o cálculo da capacidade de cruzamentos em interseções em nível, adotada pelo capítulo 10 do HCM [TRB, 1994]:

$$C = \frac{3600}{t_c} e^{\left[\frac{-q_p}{3600} (g_c - 0.5t_c) \right]} \quad (8)$$

onde

C : capacidade de cruzamentos da via secundária (vpe/h);

q_p : volume de tráfego da via principal (vph);

g_c : gap médio aceito por automóveis (7,79 s para a interseção Pradla e 10,50 s para a interseção Bonfim); e

t_c : tempo de cruzamento médio dos automóveis, ou “move-up time” (2,71 s).

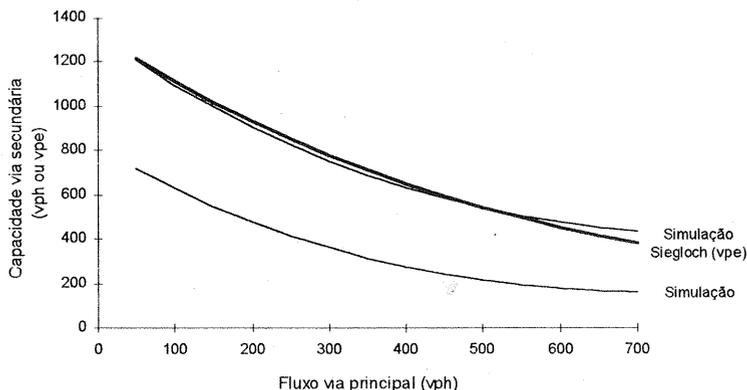


Figura 7
Capacidade da via secundária - interseção Pradla

5.3. Tempos Médios de Espera e Nível de Serviço

As Figuras 9 e 10 mostram, respectivamente, superfícies relativas aos tempos médios de espera nas interseções Pradla e Bonfim, divididas em regiões de acordo com o critério de nível de serviço proposto pela versão de 1994 do HCM [TRB, 1994]. Nota-se que para fluxos da via principal maiores que 550 vph na interseção Pradla ou 300 vph na interseção Bonfim, e para qualquer volume de tráfego na via secundária, o nível de serviço das interseções seria F, com esperas médias maiores que 45 s/veículo. Isso é resultado da elevada percentagem de caminhões e ônibus (80% na interseção Pradla e 73% na interseção Bonfim) realizando manobras de cruzamento.

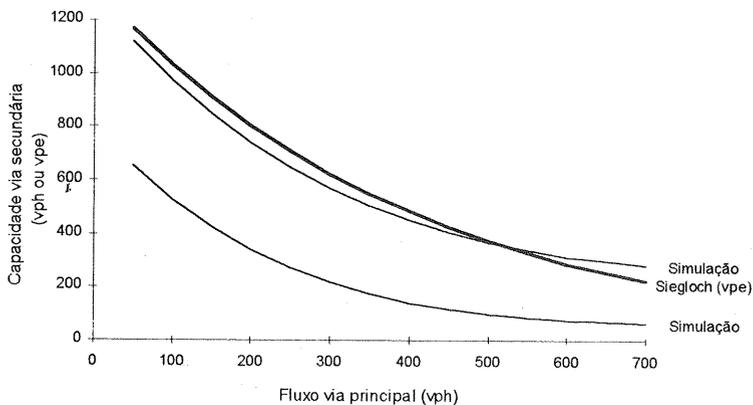


Figura 8
Capacidade da via secundária - interseção Bonfim

Para um fluxo de 550 vph na via principal da interseção Pradla, o gap médio para veículos em fluxo livre seria igual a 12,61 s e a percentagem de veículos em pelotão é igual a 57%. Como os veículos de grande porte necessitam de gaps de maior duração do que os automóveis, as oportunidades de cruzamento com segurança tornam-se reduzidas, aumentando o tempo médio de espera na interseção. A probabilidade de aceitação de um gap de 12,61 s de duração, determinada pelos modelos Logit, é de 0,64 para um caminhão médio, 0,28 para um caminhão+reboque e 0,09 para um treminhão.

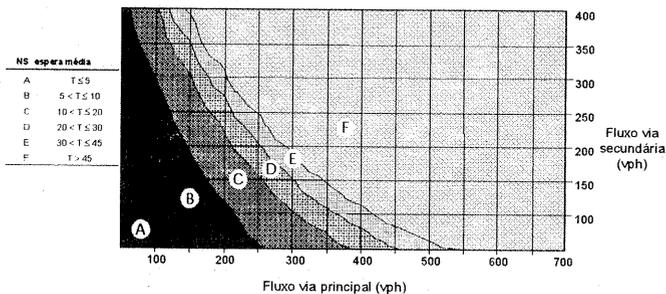


Figura 9
Tempos médios de espera e níveis de serviço - interseção Pradla

Na interseção Bonfim, para 300 vph na via principal, o gap médio do fluxo livre seria 18,04 s e a porcentagem de veículos em pelotão igual a 38%. Neste caso, a probabilidade de aceitação de um gap de 18,04 s é 0,52 para um caminhão médio, 0,27 para um caminhão+reboque e 0,24 para um treminhão. Considerando um gap de 12,61 s na via principal (fluxo de 550 vph), a probabilidade de aceitação seria 0,17 para o caminhão médio, 0,09 para o caminhão+reboque e 0,06 para o treminhão, valores que são reflexo das piores condições de visibilidade existentes nesta interseção e que acabam por degradar o nível de serviço de uma forma mais acentuada.

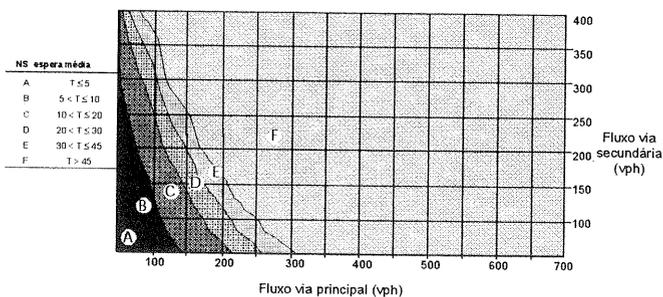


Figura 10

Tempos médios de espera e níveis de serviço - interseção Bonfim

Considerando as condições de tráfego observadas nas duas interseções durante as coletas de dados, no ano de 1994, os níveis de serviço obtidos seriam D para a interseção Pradla (352 vph na via principal e 105 vph na via secundária) e E para a interseção Bonfim (296 vph na via principal e 62 vph na via secundária). O nível de serviço D corresponde a esperas médias entre 20 e 30 s/veic., enquanto que o nível de serviço E corresponde a tempos de espera entre 30 e 45 s/veic.

5.4. Porcentagem de Utilização da Interseção

As Figuras 11 e 12 mostram as porcentagens de utilização da interseção em função dos fluxos das vias principal e secundária nas interseções Pradla e Bonfim. É interessante notar que em algumas situações não haveria uma relação direta entre a porcentagem de utilização e o tempo

de espera ou o nível de serviço da interseção. Percentagens de utilização entre 0,3 e 0,4 (interseção Pradla) ou entre 0,2 e 0,3 (interseção Bonfim) podem ser esperadas em situações onde o tempo médio de espera é maior que 45 segundos, correspondendo a um nível de serviço F. Nesse caso, o principal responsável pela redução do nível de serviço na interseção seria o elevado fluxo de veículos na via principal e a conseqüente redução do número de gaps de maior duração.

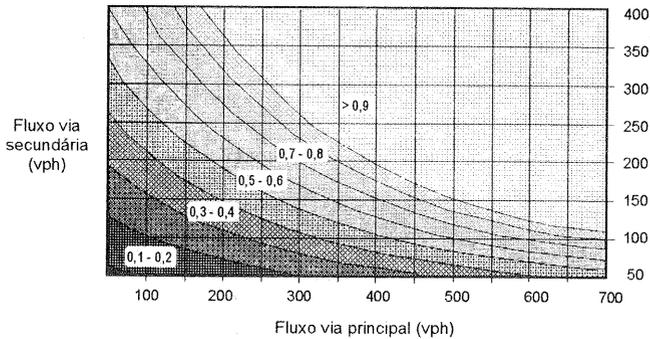


Figura 11
Porcentagem de utilização - interseção Pradla

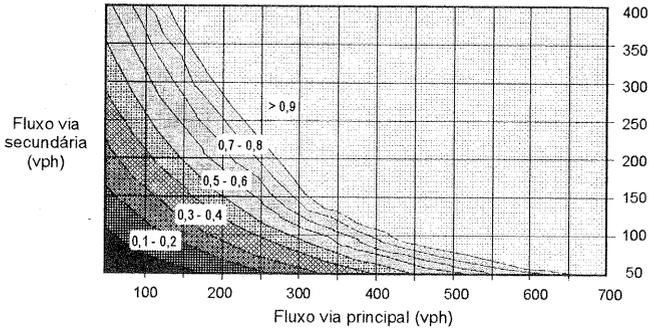


Figura 12
Porcentagem de utilização - interseção Bonfim

Considerando as condições observadas durante as coletas de dados, a porcentagem de utilização da interseção Pradla estaria em torno de 0,4 - 0,5, enquanto que esta porcentagem estaria entre 0,2 - 0,3 na interseção Bonfim.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este trabalho apresentou um método de avaliação do impacto de veículos de grande porte (caminhões e ônibus) na capacidade e no nível de serviço de interseções rodoviárias não semaforizadas. O impacto gerado na capacidade de cruzamentos foi expresso em função do fator de equivalência veicular, enquanto que o nível de serviço foi estabelecido utilizando-se o critério proposto pela versão mais recente do HCM [TRB, 1994], associado aos tempos médios de espera decorridos em função das manobras de cruzamento. Os fatores de equivalência, bem como os tempos médios de espera, foram obtidos através de simulação de diversas condições operacionais previstas em interseções.

Os equivalentes veiculares obtidos mostram que o impacto é maior para caminhões articulados, como o caminhão+reboque e o treminhão, enquanto que para caminhões médios foram obtidos equivalentes próximos ou maiores do que os obtidos para caminhões semi-reboque, indicando que o impacto provocado pelo caminhão médio na operação e na capacidade da interseção se deve à sua menor relação-potência/peso, reflexo de fatores característicos deste tipo de veículo, tais como idade avançada, sobrecarga ou estado de manutenção do veículo.

Os resultados obtidos indicam também que os fatores de equivalência são em geral maiores que os valores fornecidos pelo HCM [TRB, 1994]. Verifica-se que quanto maior o tamanho ou peso do veículo, maior é a variação do equivalente veicular em função do fluxo de tráfego da via principal, na medida em que a porcentagem de gaps de tamanho adequado para o cruzamento dos veículos de grande porte diminui com o aumento do fluxo de tráfego na via principal.

Para o caso específico das interseções analisadas, no ano de 1994, foram obtidos níveis de serviço D (Pradla) e E (Bonfim), função da elevada porcentagem de veículos de grande porte que cruzam a interseção. Foram obtidos, para a interseção Pradla, tempos médios de espera entre 20 e 30 s e porcentagem de utilização da interseção entre 0,4 e 0,5. Para a interseção Bonfim foram obtidos tempos de espera entre 30 e 45 s e

porcentagens de utilização entre 0,2 e 0,3. Os resultados obtidos são, entretanto, teóricos e recomenda-se sua validação posteriormente através da coleta de tempos de espera nas interseções analisadas. Dessa forma, os resultados poderiam ser aplicados talvez a outras interseções rodoviárias de geometria semelhante às interseções em questão. Uma maior quantidade de dados coletada em diferentes interseções, pode ser útil tanto na calibração de modelos mais abrangentes, como na validação dos resultados obtidos.

Recomenda-se ainda que futuros estudos a respeito do assunto enfoquem alguns aspectos, que por limitação de tempo e recursos disponíveis, foram tratados de forma pouco aprofundada neste trabalho. Seria interessante, por exemplo uma investigação mais detalhada de qual relação existente entre a porcentagem de veículos trafegando em pelotão e o fluxo da via principal, além da verificação se outras variáveis, tais como a velocidade do fluxo de tráfego na via principal, podem ser incorporadas aos modelos de aceitação de gaps, tornando-os mais representativos do comportamento dos veículos nas manobras de cruzamento.

E, finalmente, recomenda-se a elaboração de uma nova versão do simulador mais completa, capaz de simular simultaneamente todos os acessos de uma interseção rodoviária, levando-se em conta também os conflitos existentes entre veículos da via secundária durante manobras de conversão à esquerda. Pretende-se assim elaborar um método mais completo, que pode ser útil para o desenvolvimento de um Manual de Capacidade Viária mais adaptado às condições nacionais do que o HCM, fornecendo ainda subsídios para a revisão de elementos de projeto geométrico de interseções, tais como a distância de visibilidade necessária para que as manobras de cruzamento sejam realizadas com segurança.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO [1990]. *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets*. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D. C.
- DEMARCHI, S. H. [1995]. *Influência dos Veículos Pesados na Capacidade de Interseções Rodoviárias*. Dissertação (Mestrado), EESC, USP. São Carlos - SP.
- FITZPATRICK, K. [1991]. "Gaps Accepted at Stop Controlled Intersections". *Transportation Research Record 1303*, págs. 103-112.
- MASON JR., J. M.; FITZPATRICK, K. E HARWOOD, D. W. [1990]. "Field Observations of Truck Operational Characteristics Related to Intersection Sight Distance". *Transportation Research Record 1280*, págs. 163-172.
- SETTI, J. R. A.; DEMARCHI, S. H. [1996]. Assessing Heavy Vehicle Impacts on the Operation of Rural At-Grade Intersections in Brazil. Artigo aceito para publicação no *Transportation Research Record*, TRB, Washington, DC, EUA. Pre-print n. 960771.
- TRB [1994]. *Highway Capacity Manual. Special Report 209*. National Research Council, Washington, D.C., 3ª edição revisada.