

Programação Semafórica: uma análise comparativa de alguns métodos

Walter Porto Jr.

Programa de Engenharia de Transportes
COPPE / UFRJ

RESUMO

O presente trabalho faz uma análise comparativa entre os métodos desenvolvidos por Greenshields, Maecke, Gleue, Pavel, Webster e pelo Highway Capacity Manual para a programação semafórica de tempo fixo em interseções isoladas. Estes métodos são classificados em dois grupos distintos: os que consideram o conceito do Headway de Saturação como referência e aqueles que preferem adotar o do Fluxo de Saturação. Todas as etapas relevantes do processo de programação semafórica são comentadas e referenciadas a cada um dos métodos citados. Como resultado da análise comparativa, verifica-se que os métodos pertencentes ao grupo do Headway de Saturação são mais adequados a nossa realidade, uma vez que suas aplicações demandam menores recursos técnicos e financeiros. Entre os métodos deste grupo, o Método de Maecke demonstrou ser o mais elaborado, principalmente no que se refere a consideração da variação do volume de tráfego e do cálculo do tempo entreverdes. Quanto aos fluxos de pedestres, estes são considerados de forma superficial por todos os métodos. Isso significa que nenhum deles assegura o correto atendimento da demanda dos fluxos de pedestres.

Traffic Signal Setting: a comparative analysis of some methods

ABSTRACT

This paper presents a comparative analysis of the methods developed by Greenshields, Maecke, Gleue, Pavel, Webster and the

Highway Capacity Manual for fixed-time traffic signal settings for single intersections. These methods were classified according to two distinct groups: the first one considers the Saturation Headway concept as the basis for calculation; the second one takes the Saturation Flow as the main reference. All relevant aspects of each method have been investigated. The results of the comparative analysis have indicated that the methods which take into account the Saturation Headway are more adequate to Brazilian operation conditions, as their use require less resources and technical support. Among the methods in this group, Maecke's has presented the best performance since it considers variation in traffic intensity and intergreen time. The treatment of pedestrian flows is considered to be superficial in all the methods which have been analysed. That means that none of these methods can assure that pedestrian flows demand is adequately satisfied.

1. Introdução

Todos os métodos de cálculo de uma programação semaforica de tempo fixo, em uma interseção isolada, podem ser classificados como variações dos enfoques abordados nos dois seguintes trabalhos pioneiros:

- Greenshields, B.D., Schapiro, D., Eriksen, E.L. Traffic Performance at Urban Street Intersections, Technical Report Nr.1, Yale Bureau of Highway Traffic, New Haven Conn., 1947;
- Highway Capacity Manual (HCM), Bureau of Public Road, Wasghington D.C., 1950.

Estes trabalhos diferenciam-se basicamente no princípio adotado como referência para estimar o escoamento máximo admissível de tráfego.

No Método de Greenshields, o tempo de verde é definido em função do Headway de Saturação (ts). O Headway de Saturação representa o intervalo de tempo mínimo admissível entre dois veículos consecutivos durante o escoamento de uma fila de veículos. Definido desta forma, o Headway de Saturação corresponde à situação de fluxo máximo. Entre os métodos que adotam este princípio, além do Método de Greenshields, destacam-se o Método de Gleue e o Método de Maecke, este último descrito

minuciosamente na bibliografia (6). Estes três métodos serão incluídos na análise comparativa apresentada nos próximos ítems.

Quanto ao Método do HCM, o cálculo do tempo de verde é realizado com base no Fluxo de Saturação (S). O Fluxo de Saturação representa a capacidade máxima de escoamento de uma corrente de fluxo durante uma hora ininterrupta. Além do HCM, serão analisados, em seguida, os métodos de Pavel e de Webster que adotam o mesmo princípio da capacidade de fluxo horário.

O objetivo deste trabalho é o de destacar as etapas mais importantes do processo de determinação de uma programação semafórica de tempo fixo, para possibilitar uma análise comparativa entre os métodos disponíveis. Porém, não se pretende fazer aqui, uma análise de todos os métodos existentes e sim dos métodos pioneiros e daqueles mais difundidos, os quais representam a base de referência dos novos métodos. Portanto, os “softwares” desenvolvidos para a determinação de uma programação semafórica de tempo fixo não farão parte desta análise, pois exigiria um outro tipo de abordagem. No entanto, vale salientar que a maioria destes “softwares” foram desenvolvidos

na Inglaterra, ou nos Estados Unidos da América, e se baseiam nos princípios do Método de Webster, e do HCM, respectivamente. Como por exemplo: o SIGSET (1971) e o SIGCAP (1976) desenvolvidos pelo Prof. Richard E. Allsop e o OSCADY (1987) do “Department of Transport”, na Inglaterra, referenciam-se ao Método de Webster. Enquanto os softwares HCS (1987) do “Federal Highway Administration” e o PASSER II (1987) do “Texas State Department of Highways and Public Transportation” consideram como base o Método HCM.

A correta adequação de uma programação semafórica ao tráfego local depende do desenvolvimento criterioso das seguintes etapas:

- a) Levantamento de dados;
- b) Definição da distribuição de fases;
- c) Definição da qualidade de atendimento da demanda;
- d) Cálculo dos tempos entreverdes;
- e) Cálculo dos tempos de verde para os veículos;
- f) Cálculo dos tempos de verde para os pedestres;
- g) Cálculo do ciclo;

h) Apresentação do diagrama dos tempos dos semáforos.

As duas primeiras etapas relacionadas acima, são pré-requisitos necessários para o emprego de qualquer método de programação semaforica. Enquanto a última, representa o resultado final da programação sugerida, após efetuadas todas as operações de cálculo. Com exceção destas, as demais etapas são abordadas de forma ligeiramente diferente por cada método. Alguns deles dão mais ênfase a certas etapas e tratam superficialmente as outras.

Para possibilitar a análise comparativa, foi feita uma uniformização da apresentação das variáveis e das fórmulas empregadas nos seis métodos em estudo.

2. Definição da qualidade de atendimento da demanda

Os volumes dos fluxos de veículos, levantados em campo, são geralmente corrigidos em função da composição do tráfego horário. O carro de passeio é adotado como unidade de veículo padrão de equivalência (uvp), por ser o veículo mais utilizado no tráfego. Greenshields e Maecke alteram os volumes medidos em campo através de fatores de equivalência correspondentes aos diversos tipos de

veículos que compõem o tráfego. Pavel, Webster e o HCM, por sua vez, modificam o volume de tráfego através de fatores de influência dependendo das percentagens dos respectivos tipos de veículos. Apenas Gleue considera desnecessário corrigir o volume de tráfego levantado em função de sua composição.

Os volumes médios de tráfego horário, geralmente, são obtidos através de observações nas horas de ocorrência dos fluxos mais carregados. Devido à oscilação na intensidade de fluxo de veículos, que varia mesmo durante o período de uma hora, faz-se necessário empregar valores médios. Portanto, em alguns momentos, estes valores médios são ultrapassados. Com isso, para garantir uma melhor qualidade de atendimento da demanda, é necessário adotar, para efeito de cálculo, valores ligeiramente superiores aos volumes médios.

A maioria das pesquisas considera a Distribuição de Poisson como a mais indicada para descrever a oscilação do tráfego. Greenshields, Maecke, Pavel e Webster mencionam a Distribuição de Poisson em seus respectivos métodos. Greenshields, entretanto, não a utiliza na consideração da qualidade de atendimento da

demanda. Para isso, ele sugere adotar um valor maior do que 4,75 segundos como tempo de inércia (tin), ou seja, tempo perdido pelos primeiros veículos da fila para vencer a inércia inicial e atingir o regime de deslocamento correspondente ao fluxo máximo. Porém, Greenshields não fornece maiores explicações sobre a relação entre o valor a ser adotado para o tempo de inércia e a qualidade de atendimento obtida.

Maecke assegura a qualidade de atendimento da demanda sugerindo a adoção de um valor para o tráfego horário, maior do que o valor médio obtido em campo. Este valor deve corresponder ao indicado pela Distribuição de Poisson, no intervalo de confiança entre 90% a 95% de certeza de não haver sobrecarga. Desse modo, Maecke garante a certeza de atender a demanda de veículos em pelo menos 90% dos casos. Gleue, por sua vez, adota o recurso de expandir o valor da intensidade do fluxo, correspondente aos quinze minutos de tráfego mais carregado, para um período de uma hora. Com este valor expandido, Gleue justifica a obtenção de uma desejada qualidade de atendimento. Pavel e

Webster recomendam a utilização de fatores de influência com o propósito de alterar a relação entre o fluxo existente e o Fluxo de Saturação. Esta alteração equivale admitir, nos cálculos, que a capacidade de fluxo está mais próxima de ser atingida. Em outras palavras, isto significa considerar que, na prática, existe uma folga maior do que aquela adotada nos cálculos. Desse modo, a probabilidade de haver sobrecarga diminui garantindo, assim, uma melhor qualidade no atendimento da demanda. O HCM (1985) define seis níveis de serviço para classificar a qualidade de atendimento da demanda. Estes níveis são identificados pelas letras de A a F. Nas interseções viárias urbanas o HCM aconselha adotar o nível C. O nível C corresponde a um tempo de espera por veículo, variando entre 15,1 e 30 segundos. Por outro lado, este afirma que a média de 60 segundos de espera por veículo, deveria ser adotada como valor máximo tolerável nas interseções da malha urbana, o que corresponde ao nível D. O Quadro 1 apresenta o resumo da qualidade de atendimento da demanda adotada por estes métodos.

Quadro 1: Qualidade de atendimento da demanda

MÉTODOS DO HEADWAY DE SATURAÇÃO	QUALIDADE DE ATENDIMENTO
GREENSHIELDS MAECKE GLEUE	Tempo de inércia $> 4,75$ segundos Distribuição de Poisson Expansão dos 15 minutos de tráfego mais carregado.
MÉTODOS DO FLUXO DE SATURAÇÃO	
PAVEL WEBSTER HCM	Fatores de influência Fatores de influência Nível de serviço C

3. Cálculo dos tempos entreverdes

O tempo entreverdes (tev) é o intervalo de tempo entre o fim do tempo de verde de uma determinada fase (ou estágio) e o início do tempo de verde da fase seguinte. O objetivo do tempo entreverdes é o de reduzir a probabilidade de choques entre as correntes de fluxos conflitantes nas mudanças de fases. Portanto, para cada mudança de fase deve-se calcular o valor do tempo entreverdes. Com exceção dos métodos de Maecke, de Gleue e de Pavel, os demais métodos não apresentam explicações detalhadas sobre a determinação dos tempos entreverdes. Geralmente, quando não

há informação sobre o cálculo do tempo entreverdes, costuma-se confundir este valor com o tempo de amarelo. Porém, o cálculo do tempo de amarelo não é devidamente esclarecido pela maioria destes métodos. Greenshields, por exemplo, não faz nenhuma consideração sobre o cálculo do tempo entreverdes. Ele adota um fator de atraso constante, por fase, igual a 4,75 segundos, o qual deve englobar o tempo perdido devido à inércia dos primeiros veículos da fila e o tempo entreverdes. Neste caso, podemos considerar o tempo entreverdes como sendo igual ao tempo de amarelo. Quanto aos métodos de Maecke, de Gleue e de Pavel, no que se

refere ao tempo entreverdes, estes sugerem seu cálculo de forma minuciosa. Para isso, é necessário determinar todos os pontos de conflito, ou seja, os pontos de cruzamento das linhas de percurso de todos os fluxos da interseção viária em estudo. Em seguida, calcula-se o tempo entreverdes através da seguinte fórmula:

$$\text{tev} = \text{tad} + \text{tl} - \text{ta} \quad (1)$$

tev –tempo entreverdes, (segundos);

tad –tempo adicional ou fração de tempo utilizada pelo último veículo para iniciar sua travessia, contada a partir do fim do tempo de verde até o momento em que este veículo atinge a linha de retenção e entra na área de conflito da interseção. Este tempo depende do comportamento dos motoristas e do tráfego em geral, portanto, deve ser medido em campo (segundos);

tl –tempo de liberar ou tempo gasto pelo último veículo para liberar a área de conflito, ou seja, tempo gasto no percurso da linha de retenção até o ponto de conflito (segundos);

ta –tempo de atingir ou tempo gasto pelo primeiro veículo, da fase seguinte, para percorrer a distância que o

separa do ponto de conflito (segundos).

Para garantir a segurança, a cada mudança de fase, adota-se o valor do tempo entreverdes correspondente ao ponto de conflito crítico, ou seja, aquele cujo tempo entreverdes é maior. O HCM faz menção ao intervalo de mudança (tempo entreverdes) como sendo a soma do tempo de amarelo (tam) com o tempo de vermelho total (tvm), ou seja, tempo em que todos os semáforos para veículos apresentam a luz vermelha. Porém, não esclarece como se deve calcular este intervalo de mudança. Webster, por sua vez, trabalha com o conceito de verde efetivo (tempo efetivamente aproveitado para a travessia de todos os veículos em regime de Fluxo de Saturação). Neste caso, é necessário adotar o conceito de tempo perdido (tp), ou seja, tempo não utilizado pelos veículos em regime de fluxo máximo (Fluxo de Saturação), para realizar a travessia da interseção. Este tempo pode ser expresso pela seguinte fórmula:

$$\text{tp} = \text{tin} + (\text{tev} - \text{tam}) \quad (2)$$

Colocando-se “tev” em evidência, obtém-se:

$$\text{tev} = \text{tam} + \text{tp} - \text{tin} \quad (3)$$

tp –tempo perdido ou tempo não utilizado pelos veículos, em regime de fluxo máximo,

para realizar a travessia (segundos);
 tin – tempo de inércia, ou seja, tempo perdido pelos primeiros veículos da fila para vencer a inércia e atingir o regime de fluxo máximo (segundos);

tam – tempo de amarelo (segundos);
 tev – tempo entreverdes, definido no início deste ítem (segundos).

O Quadro 2 apresenta o resumo do cálculo do tempo entreverdes para cada um dos métodos em estudo.

Quadro 2: Tempo entreverdes correspondente a cada método.

MÉTODOS DO HEADWAY DE SATURAÇÃO	TEMPO ENTREVERDES (tev) (segundos)
GREENSHIELDS MAECKE e GLEUE	tev = tam tev = tad + tl - ta
MÉTODOS DO FLUXO DE SATURAÇÃO	
PAVEL WEBSTER HCM	tev = tad + tl - ta tev = tam + tp - tin tev = tan + tvn

tam – tempo de amarelo (segundos);
 tad, tl, ta – tempo adicional, tempo de liberar e tempo de atingir o ponto de conflito, respectivamente;
 tin, tp – tempo de inércia e tempo perdido;
 tvn – tempo de vermelho total, ou seja, tempo em que todos os semáforos de veículos apresentam

a luz vermelha simultaneamente (segundos).

No caso dos métodos de Greenshields, de Webster e do HCM, o tempo de amarelo (tam) deve ser calculado considerando a hipótese de que o último veículo da corrente interrompida atinge a linha de retenção no momento da mudança da luz amarela para a luz

vermelha. Assim, enquanto este último veículo realiza a travessia da área de conflito da interseção, todos os semáforos estariam fechados, o que corresponde ao vermelho total (tvm). O valor calculado para o tempo de amarelo, admitindo-se esta hipótese, deve coincidir com o tempo adicional, medido em campo. No caso do tempo adicional ser maior do que este tempo de amarelo, os tempos de entreverdes estariam subdimensionados. Isto implicaria em falta de segurança. Como o objetivo do tempo entreverdes é reduzir a probabilidade de choques entre veículos, é sempre mais seguro adotar nas fórmulas o tempo adicional (tad), ao invés do tempo de amarelo (tam).

4. Cálculo dos tempos de verde para os veículos

O tempo de verde é calculado para cada fase e deve ser suficientemente amplo para dar vazão a

todos os veículos que chegam na interseção durante o período de um ciclo, através das correntes de fluxo liberadas pela fase em questão. Para possibilitar a comparação dos seis métodos analisados, foi feita uma uniformização das variáveis e da apresentação das correspondentes equações utilizadas. Com este objetivo, as fórmulas apresentadas no Quadro 3 referem-se ao tempo de verde efetivo (tv). Entende-se por tempo de verde efetivo como sendo o tempo necessário para dar vazão a todos os veículos de uma determinada fase, admitindo-se que estes se deslocam em regime de fluxo máximo. Para obter o tempo de verde real (tv'), ou seja, o tempo de duração da luz verde do semáforo, basta adicionar ao tempo de verde efetivo, o tempo perdido para vencer a inércia inicial da fila de veículos (tin) e subtrair o tempo adicional (tad).

Quadro 3: Fórmulas empregadas no cálculo do tempo de verde efetivo para os veículos.

MÉTODOS DO HEADWAY DE SATURAÇÃO	TEMPO DE VERDE EFETIVO (t_v) (segundos)
GREENSHIELDS	$t_v = (C).(M/3600).(ts)$
MAECKE	$t_v = (C).(M1/3600).(ts)$
GLEUE	$t_v = (C).(M2/3600).(ts)$
MÉTODOS DO FLUXO DE SATURAÇÃO	
PAVEL	$t_v = (C).(M3/S)$
WEBSTER	$t_v = (C1 - \sum tp).[(M3/S1)/\sum(M3/S1)]$
HCM	$t_v = (C).(M3/S1)$

C – ciclo (segundos);

ts – Headway de Saturação (segundos/veíc);

M – volume de tráfego horário modificado por fatores de equivalência em função da percentagem de certos tipos de veículos no tráfego em unidade de veículo padrão por hora (uvp/h);

M1 – volume de tráfego horário modificado por fatores de equivalência em função da composição do tráfego e por uma determinada probabilidade de Poisson (variando no intervalo entre 0,90 e 0,95) (uvp/h);

M2 – volume de tráfego horário

correspondente à expansão dos quinze minutos mais carregados. Aqui não é feita nenhuma correção do volume para uma unidade de veículo padrão (veíc./h);

M3 – volume de tráfego horário modificado por fatores de influência, em função das percentagens de certos tipos de veículos e das características da via e do tráfego (uvp/h);

S – fluxo de saturação (uvp/h);

S1 – fluxo de saturação modificado por fatores de influência, em função das características da via e do tráfego (uvp/h).

Para os métodos pertencentes ao grupo do Headway de Saturação, o tempo de verde efetivo é determinado multiplicando-se o número admissível de veículos que chegam, por ciclo através do fluxo mais carregado da fase, pelo valor do Headway de Saturação (ts), conforme indicado no Quadro 3. Neste grupo, os métodos distinguem-se entre si apenas no procedimento adotado na determinação do volume horário de veículos para efeito de cálculo do tempo de verde efetivo.

No caso dos métodos pertencentes ao grupo do Fluxo de Saturação, o tempo de verde efetivo é calculado multiplicando-se o ciclo pela taxa de ocupação correspondente ao fluxo mais carregado da fase. A taxa de ocupação é obtida dividindo-se o volume horário de veículos pelo respectivo Fluxo de Saturação (S). Aqui a diferença básica entre os métodos deve-se aos fatores de influência considerados por método, para a alteração do volume de tráfego horário e do Fluxo de Saturação.

5. Cálculo do ciclo

No início de cada fase, a fila de veículos liberada para a travessia precisa vencer a inércia inicial. Conforme já foi mencionado no ítem 3, o tempo de inércia (tin)

representa o tempo não aproveitado pelos veículos para realizar a travessia em regime de fluxo máximo. Além deste tempo perdido devido a inércia, existe um outro tempo perdido correspondente ao tempo gasto pelo último veículo do fluxo interrompido para liberar a área de conflito da interseção. Somando-se, portanto, todos os tempos de verde efetivo, correspondente a cada uma das fases, com o somatório dos tempos perdidos nas mudanças destas fases, obtém-se o valor do ciclo, ou seja:

$$C = \sum(tv) + \sum(tp) \quad (4)$$

Para determinar as equações do ciclo, apresentadas no Quadro 4, basta substituir na equação (4) as fórmulas do tempo de verde efetivo (Quadro 3) e do tempo perdido por ciclo e, em seguida, colocar em evidência a variável (C) que representa o ciclo.

Quanto ao Método de Webster, este declara que o ciclo ótimo é aquele que corresponde ao menor tempo de espera por veículo, em uma interseção semaforizada. Para a obtenção deste ciclo ótimo, Webster demonstra que seria necessário somar cinco segundos ao total de tempo perdido por ciclo e multiplicar este valor por 1,5. Deste modo, substi-

tuindo na equação (4), o valor do somatório dos tempos de verde efetivo e o valor modificado do total de tempo perdido por ciclo, obtém-se a seguinte expressão:

$$C = (C) \cdot [\sum(M3/S1)] + (1,5) \cdot (\sum tp + 5),$$

ou seja:

$$C = [(1,5) \cdot (\sum tp + 5)] / [1 - \sum(M3/S1)] \quad (5)$$

Conforme observa-se no

Quadro 4, o numerador das equações para o cálculo do ciclo representa o total de tempo perdido. Verifica-se que apenas Maecke, Gleue e Pavel apresentam as mesmas variáveis para determinar o valor do total de tempo perdido. Os demais métodos divergem, ligeiramente, quanto a forma de cálculo deste tempo.

Quadro 4: Fórmulas empregadas no cálculo do ciclo.

MÉTODOS DO HEADWAY DE SATURAÇÃO	CICLO (C) (segundos)
GREENSHIELDS MAECKE GLEUE	$C = \sum(tam + tin) / [1 - \sum(M/3600) \cdot (ts)]$ $C = \sum(tev + tin) / [1 - \sum(M1/3600) \cdot (ts)]$ $C = \sum(tev + tin) / [1 - \sum(M2/3600) \cdot (ts)]$
MÉTODOS DO FLUXO DE SATURAÇÃO	
PAVEL WEBSTER HCM	$C = \sum(tev + tin) / [1 - \sum(M3/S)]$ $C = [(1,5) \cdot (\sum tp + 5)] / [1 - \sum(M3/S1)]$ $C = \sum(tam + tvm) / [1 - \sum(M3/S1)]$

$\sum tp = \sum(tin + tev - tam)$
 tp, tin, tev, tam – tempo perdido, tempo de inércia, tempo entrecruzes e tempo de amarelo, respectivamente (ver equação 2);
 ts – Headway de Saturação, definido no item 1.

$M, M1, M2, M3$ – volume de tráfego horário (ver Quadro 3);
 S – Fluxo de Saturação definido no item 1;
 $S1$ – Fluxo de Saturação modificado por fatores de influência;
 tvm – tempo de vermelho total ou intervalo de tempo em que

todos os semáforos de veículos apresentam a luz vermelha (segundos).

6. Tempo de verde para os pedestres

A distribuição de tempo de verde para os pedestres é efetuada após a definição do ciclo e dos tempos de verde para os veículos. Sempre que durante uma determinada fase os fluxos de veículos liberados não interceptam uma determinada travessia de pedestres, aproveita-se esta fase para liberar, também, o respectivo fluxo de pedestres. Assim, o tempo de verde para os pedestres fica condicionado à duração do tempo de verde dos veículos. Quando a distribuição de fases não permite atender a todas as travessias de pedestres, inclui-se na programação um período de tempo denominado de **vermelho total**, ou seja, todos os semáforos da **interseção** (exceto os semáforos dos pedestres) apresentam a luz vermelha. Com a finalidade de evitar prejuízos para os fluxos de veículos, o **vermelho total** é calcu-

lado para garantir apenas um tempo de verde mínimo admissível para os fluxos de pedestres. Entre os métodos apresentados, somente o de Webster e o do HCM definem um valor para o tempo de verde mínimo para os pedestres. Enquanto Maecke, após a definição da programação semafórica, sugere verificar se o tempo disponível para a travessia dos pedestres é suficiente para atender a demanda existente. Para isso, Maecke calcula o tempo de verde necessário para os pedestres em função da demanda existente, da velocidade de caminhada e da largura da faixa de pedestres. Caso o valor deste tempo seja maior do que o tempo de verde disponível para os pedestres, Maecke sugere elaborar uma nova programação, uma vez que o processo de cálculo do ciclo semafórico não inclui o cálculo do tempo de verde necessário para os pedestres. O Quadro 5 apresenta as respectivas fórmulas de cálculo do tempo de verde para os pedestres.

Quadro 5: Tempo de verde para os pedestres.

MÉTODOS DO HEADWAY DE SATURAÇÃO	Tempo de verde para os pedestres (tvp) (segundos)
GREENSHIELDS	não menciona
MAECKE	$tvp = (C).(M1p/3600) / (Vp.Dp.Lp)$
GLEUE	não menciona
MÉTODOS DO FLUXO DE SATURAÇÃO	
PAVEL	não menciona
WEBSTER	$tvp = 5 + (L/Vp)$
HCM	$tvp = 7 + (L/1,22) + (tam + tvm)$

L –largura da rua da travessia (m);

Vp –velocidade de caminhada (m / segundo);

Mop –volume horário de pedestres considerando uma probabilidade de Poisson entre 90% a 95% de não haver sobrecarga (ped / h);

Dp –densidade de pedestres, dada em função da velocidade de caminhada (ped / m);

Lp –largura da faixa de pedestre (m);

tam, tvm, C – tempo de amarelo, tempo de vermelho total e ciclo, respectivamente.

7. Conclusões

Além da diferença básica entre os métodos que adotam o Headway de Saturação e aqueles que consideram o Fluxo de Saturação, observa-se que eles sugerem critérios diferentes para garantir uma determinada qualidade de atendimento à demanda, a fim de compensar a oscilação da intensidade de tráfego. Para isso, são feitas algumas alterações no valor do fluxo de veículos conforme mencionado no ítem 2. Com relação ao cálculo dos tempos entreverdes, os métodos de Maecke, de Pavel e de Gleue são indiscutivelmente os mais precisos. Esta precisão resulta de um

estudo minucioso dos pontos de conflito, além da consideração do tempo adicional, que traduz o comportamento do tráfego melhor do que o tempo do amarelo, utilizado pelos outros métodos. Conforme pode-se verificar através dos quadros 3 e 4, de um modo geral, as equações empregadas nos cálculos do tempo de verde efetivo e do ciclo variam apenas na forma de definir o volume de tráfego, para efeito de cálculo, e na forma de considerar o tempo perdido, ou seja, o tempo não aproveitado para realizar a travessia em regime de fluxo máximo.

O emprego criterioso dos métodos pertencentes ao grupo do Fluxo de Saturação depende de exaustivos levantamentos de dados para a determinação de fatores de influência correspondentes a nossa realidade. Como estes levantamentos exigem técnica, tempo e custos elevados, costuma-se utilizar os valores citados na bibliografia internacional. Porém, estes valores obtidos em outra realidade certamente reduzem a eficiência da programação semafórica, pois não correspondem às condições de tráfego local.

Quanto aos métodos baseados no Headway de Saturação, a sua grande vantagem deve-se não só a menor quantidade de levanta-

mentos de dados, mas principalmente à facilidade de realizar estes levantamentos. O Headway de Saturação pode ser medido facilmente em campo, por um único técnico, e todos os fatores de influência que interferem no fluxo máximo (ou Fluxo de Saturação) já estão embutidos naquele valor. Os métodos de Maecke e de Gleue, pertencentes a este grupo, apresentam a vantagem de garantir maior segurança para o tráfego, devido ao cálculo minucioso do tempo de entreverdes. No entanto, o Método de Maecke se destaca por apresentar a vantagem adicional de considerar uma forma mais elaborada, baseada na probabilidade de Poisson, para compensar a oscilação do volume de tráfego e garantir uma melhor qualidade de atendimento da demanda.

Os métodos para a determinação de uma programação semafórica de tempo fixo, numa interseção isolada, foram desenvolvidos para atender, em primeira instância, aos fluxos de veículos. Por esta razão, observa-se que no processo de cálculo destes métodos os fluxos de pedestres são sempre relegados a segundo plano. Portanto, estes não são considerados com a devida atenção que merecem. Webster e o HCM sugerem

um valor mínimo admissível para o tempo de verde dos pedestres, enquanto Maecke apresenta uma fórmula mais elaborada para a determinação do tempo de verde necessário para atender a demanda dos pedestres. Porém, nenhum dos métodos inclui o cálculo adequado do tempo de verde necessário para os pedestres no processo de determinação do ciclo semaforico.

7. Referências Bibliográficas

- PORTO JUNIOR, W., FERREIRA, A.C.M. Avaliação e sugestão para um plano semaforico. In: VII ANPET – Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, 1993, São Paulo. *Anais...* São Paulo: ANPET, 1993. 2 v. p. 831-842.
- HIGHWAY Capacity Manual. Special Report 209. Washington: Transportation Research Board, National Research Council, 1985.
- KIRSCH, H. *Road traffic in urban areas*. London: Institution of Highways and Transportation, Department of Transport, 1989.
- PORTO JUNIOR, W. *Controle de Tráfico*. Rio de Janeiro: Programa de Engenharia de Tráfego/COPPE/URFJ, 1993. Apostila.
- LAPIERRE, R. *Vorlesung: verkehrssteuerung in der stadt*. Aachen: Institut fuer Stadtbauwesen/Universidade Técnica de Aachen, 1981. Anotações de aula.
- FELDMANN, G. et al. *Liechtssignalsteuerung am einzelknoten*. Aachen: *Undruck des Lehrstuhls fuer Stadtbauwesen/Universidade Técnica de Aachen*, 1979.
- PAVEL, G. *Planen von signalanlagen fuer den strassenknoten ohne interation. Forschungsarbeiten aus dem Strassenwesen*, Bom, Heft 91, 1974.
- BRASIL. Ministério da Justiça. Departamento Nacional de Trânsito. *Manual de Semáforos*. Brasília, 1979.
- MURA, R. *Kritische untersuchung der berechnungsverfahren, die der steuerung lichtsignalregelter stadtstrassenknoten zugrunde liegen*. Aachen: Institut fuer Stadtbauwesen/Universidade Técnica de Aachen, 1975, *Diplomarbeit*.
- GLEUE, A. W. *Untersuchungen zur berechnung von zwischen-*

zeiten in Lichtsignalprogrammen. *Strassenbau und Strassenverkehrstechnik*, Bom, Heft 116, 1974.

WEBSTER, F.V. *Traffic signal settings*. London: Road Research Laboratory, 1958.

(*) Professor Adjunto do Programa de Engenharia de Transportes – COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro.