

SP 01/07/92

NT 151/92

Aspecto Fluidez no Estudo de Interseção SemafORIZADA e não SemafORIZADA

Núcleo de Estudos de Tráfego

1. Introdução

Além da segurança, o semáforo influi muito nos atrasos sofridos pelos veículos. Este atraso é frequentemente maior após a colocação do semáforo, principalmente em semáforo de um só plano a tempo fixo, que constitui a maioria do equipamento utilizado em São Paulo, em cruzamentos secundários.

Para comparar os dois atrasos (com e sem semáforo) devemos medi-los e prevê-los.

2. Atrasos em cruzamentos causados pela placa “PARE” ou outras regulamentações de prioridade equivalente

Cada veículo da via secundária deve parar e aguardar uma brecha conveniente entre os carros na via principal, para poder cruzá-la.

As variáveis importantes nesta espera são:

GI = intervalo limite de tempo entre a passagem sucessiva de dois veículos na via principal (gap limite). Abaixo do qual o veículo da transversal não cruza a via.

VI (t) = volume “instantâneo” na via (variável com o tempo).

GI varia individualmente conforme o motorista, seu veículo, sua pressa, habilidade e cuidado de cada dia. Depende também da visibilidade do local, da velocidade dos veículos da via principal, de sua largura, de ela ser mão única ou dupla, e de uma série de outros fatores locais. Não obstante todas estas variáveis, o valor médio de GI num local (média dos vários motoristas) geralmente se situa entre 4,5 e 5,5 segundos.

Já o volume instantâneo, nada mais é do que o inverso dos intervalos entre veículos, que determina diretamente quanto cada carro da transversal espera.

2.1 Fluxo aleatório de veículos na via principal

É o caso mais comum, sempre que não existirem semáforos próximos no fluxo a montante, nem semáforos à jusante cuja fila chegue até o ponto em estudo.

a) Mão única na via principal

Neste caso, mostra-se que a distribuição de intervalos (gaps) entre dois carros sucessivos é dado por:

$$F(t) = \frac{t_l - t_0}{T_l} \cdot e^{-\frac{t_0 - t}{t_l}} \quad (\text{válida para } t > t_0) \quad (1)$$

onde

$F(t)$ = probabilidade de um GAP maior que t

$$t_0 = \frac{1}{S_l}$$

$$T_l = \frac{1}{V_l}$$

V_l = volume médio da principal

S_l = capacidade da via principal

S_l se refere à capacidade usual, com o número efetivo de faixas usadas pelos veículos. Assim, se a via principal tiver 5 metros de largura, mas os veículos não usarem 2 faixas (isto é, nunca houver ultrapassagens) a capacidade será de 1 só faixa, com:

$S_l \cong 1800$ veículo /hora

$t_0 \cong 2$ segundos

Neste caso, a espera média de um veículo da transversal pode ser derivada, através de cálculos, da expressão (1), obtendo-se:

$$T_m = \frac{t_l^2}{t_l - t_0} \cdot e^{-\frac{G_l - t_0}{t_l}} - t_l - G_l - \frac{t_0^2}{2 t_l} \quad (2)$$

ou

$$T_m = \frac{1}{V_l} \left[e^{G_l V_l} \cdot \frac{e^{-y_l} - 1}{1 - y_l} - y_l^2 - \frac{G_l}{2} \right] \quad (3)$$

onde:

$y_l = \frac{V_l}{S_l}$ = taxa de ocupação

Ex: $V_l = 1.500$ $S_l = 3600$ $G_l = 5$

$$t_0 = \frac{3600 \text{ s/h}}{3600 \text{ veic/h}} = 1 \text{ s} \qquad t_l = \frac{3600 \text{ s/h}}{1500 \text{ veic/h}} = 2,4 \text{ s}$$

$$y_l = \frac{1500}{3600} = 0,417$$

Usando a fórmula (3) obtemos:

$$T_m = 2,4 \left[e^{\frac{5}{2,4}} \cdot \frac{e^{-0,417}}{1 - 0,417} - 1 - \frac{(0,417)^2}{2} \right] - 5 \quad (3)$$

$$T_m = 2,4 (8,0142 \cdot 1,14 - 1 - 0,0869) - 5$$

$$T_m \cong 14,3 \text{ segundos}$$

Quando o volume da transversal é “elevado”, pode se acumular um ou mais carros, esperando sua vez de chegar à condição de 1º da fila, para então tentar atravessar. Esta fila é dada aproximadamente por:

$$F_a = \frac{x^2}{1 - x^2} \quad (4)$$

onde

$$X^2 = \frac{V_2}{S_2g} = \frac{\text{volume da transversal}}{\text{capacidade da transversal}}$$

$$S_2g = S_2 \cdot t_l - t_0 \cdot e^{\left[\frac{t_0 - G\ell + \frac{t_0^2}{2}}{t_l} \right]} \quad (5)$$

ou

$$S_2g = S_2 (1 - y_l) e^{\left[y_l - \left(G\ell - \frac{t_0^2}{2} \right) \cdot V_1 \right]} \quad (6)$$

$$t_{02} = \frac{n_2}{S_2}$$

n_2 = número de faixas da transversal

t_{02} = tempo entre dois carros sucessivos passando na via na mesma faixa.

S_2 = capacidade de escoamento da via na transversal quando não há nenhum veículo na via principal e os veículos apenas diminuem a velocidade ou param para ver se podem cruzar. S_2 é função de visibilidade e de algum obstáculo existente (valeta), variando de 1200 a 1800 veículos/hora por faixa.

S_{2g} = capacidade real da via transversal e é função do volume da via principal e do GAP médio de aceitação G_l .

No exemplo anterior, com $S_2 = 1400$ (1 faixa) obtemos:

$$S_{2g} = 1400 \cdot 2,4 - 1 \cdot e \quad \left(\frac{1 - 5 + \frac{2,5}{2}}{2,4} \right) \cong 260 \text{ veículos/hora}$$

$$T_{02} = \frac{3600}{1400} = 2,5 \text{ segundos}$$

Supondo $V_2 = 180$ veículos/hora, obtemos:

$$X_2 = \frac{180}{260} = 0,692$$

$$F_a = \frac{X_2^2}{1 - X_2} \cong 1,6 \text{ veículos}$$

A fila total é expressa por:

$$F_t = F_a + T_m \cdot V_2 \quad (7)$$

$$F_t = 1,6 + 14,3 \cdot \frac{180}{3600} = 2,3 \text{ veículos}$$

b) Mão dupla na via principal

sendo: V_{1a} , V_{1b} os respectivos volumes de cada sentido
 y_{1a} , y_{1b} as taxas de ocupação

definem-se: $Vl = Vla + Vlb$
 e

$$Yl = yla + ylb - yla \cdot ylb$$

e aplicam-se as fórmulas (3), (5) e (7)

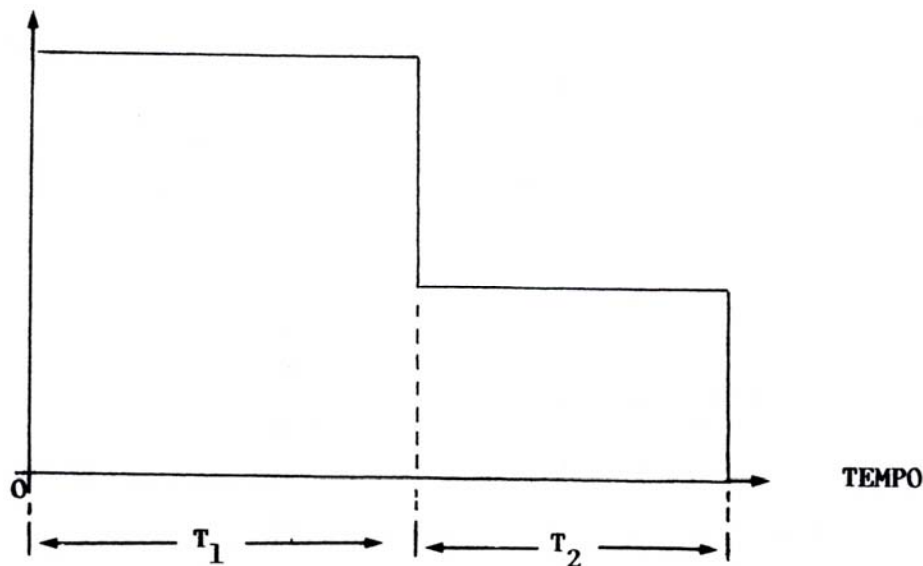
2.2. Perfil de fluxo cíclico na via principal

Normalmente, este perfil é devido à existência de semáforos à jusante.

A espera e a capacidade de descarga são funções do perfil do fluxo, variável com o tempo, não sendo possível obter equações simples em função do perfil de tráfego.

No caso do perfil ser composto apenas de 2 valores constantes que se repetem no ciclo, o tempo de espera é dado por:

PERFIL DE VOLUME



$$TE = \frac{T1 \cdot TE1 + T2 \cdot TE2 - (TE1 - TE2)^2 \left[\frac{(1 - k1)(1 - k2)}{1 - K1 \cdot K2} \right]}{T1 + T2} \quad (8)$$

onde

TE1 e TE2 = tempos de espera com os volumes que ocorrem nos períodos T1 e T2.
 Usando a fórmula (2):

$$K1 = e^{-\frac{T1}{TE1}} \qquad K2 = e^{-\frac{T2}{TE2}}$$

Quando um dos volumes é muito elevado e o outro muito baixo, isto é:

Volume muito grande: $TE1 \rightarrow \infty$

Volume muito pequeno: $TE2 \rightarrow 0$

obtém-se a fórmula normal de espera em semáforos:

$$TE = \frac{T1^2}{2 \cdot (T1 + T2)}$$

Quanto à capacidade de escoamento, ela é expressa por:

$$Sg = \frac{T1 \cdot Sg1 + T2 \cdot Sg2}{T1 + T2} \quad (9)$$

onde:

Sg1 e Sg2 são obtidos pela fórmula (6) aplicada a cada um dos intervalos (T1 e T2). Com Sg, obtém-se X e a fila aleatória.

$$X = \frac{V2}{Sg} \qquad Fa = \frac{X^2}{1 - X}$$

Caso em alguns dos intervalos (por exemplo o primeiro) se tenha $Sg < V1$, se acumulam carros neste intervalo, formando uma fila que se desmanchará só no “intervalo” seguinte. Esta fila média vale:

$$Fm = \frac{(V1 - Sg1) \cdot T1^2 \cdot (Sg2 - Sg1)}{2 (Sg2 - V2)} \quad (10)$$

A fila total será a soma das 3 parcelas.

$$Ft = Fa + Fm + Tm \cdot V2 \quad (11)$$

2.3. Medidas em campo

Nos casos de situações já existentes, é fácil e conveniente aferir-se a distribuição de GAPs, e a partir dela a fila resultante, para diferentes volumes de transversal, ou medir-se diretamente as filas.

a) Medida direta da fila secundária

A cada 5 segundos conta-se quantos carros estão parados ou esperando um GAP (primeiro da fila), ou simplesmente esperando chegar ao início da fila.

A média dos valores obtidos indica a fila média.

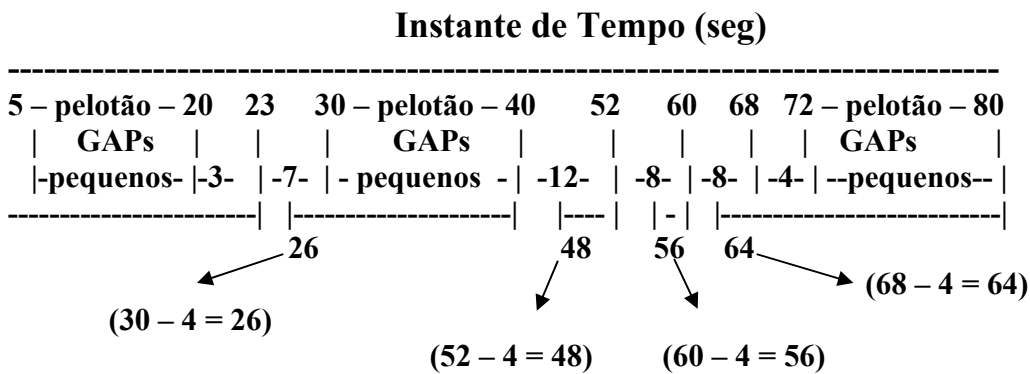
Meia hora já é uma amostra razoável.

b) Medida do GAP da via principal

Anota-se o instante da passagem (minuto, segundo) de todos os carros distantes. Quando passa um pelotão de carros próximos, anota-se apenas o instante do primeiro, o instante do último e se possível a quantidade.

Por subtração, tira-se posteriormente cada GAP.

Exemplo:



- A 1ª linha do gráfico mostra os instantes de chegada de cada carro, indicando apenas “pelotão” quando muitos carros passam juntos.
 - A 2ª linha mostra os intervalos (GAPs) entre veículos.
 - A 3ª linha indica os intervalos não disponíveis para os veículos da via transversal cruzarem a principal, que inclui desde 4 segundos antes que passe qualquer carro na principal até o instante que surge um GAP > 4 segundos.
- Os intervalos em branco são os disponíveis para cruzar. O valor de 4 segundos foi obtido pela fórmula (12) (aproximado) igualando-se $M(g) = 0$ e adotando $S2 = 0,4$.

GAP G	Nº GAPs N(G)	Nºs CARROS PASSAM P/GAP (Gℓ - 5) M(G)	Nºs CARROS PODEM PASSAR
2	-	-	-
3	1	-	-
4	1	0,1	0,1
5	-	0,5	-
6	-	0,9	-
7	1	1,3	1,3
8	2	1,7	3,4
9	-	2,1	-
10	-	2,5	-
11	-	2,9	-
12	1	3,3	3,3
TOTAL	6		N(t) = 8,1
FÓRMULA UTILIZADA		(12)	(13)

$$S2g = \frac{8,1}{80} \times 3600$$

$$S2g = 364 \text{ veículos/hora}$$

c) Capacidade de escoamento

Para cada GAP (G) assume-se uma capacidade em carros passando:

$$M(G) = 0,5 + (G - G\ell) \cdot S2 \quad (12)$$

G1 = Gap limite

S2 = Capacidade

e tabulando-se o número de GAPs, calcula-se quantos carros poderiam passar:

$$Nt = \sum N(G) \cdot M(G) \quad (13)$$

d) Espera média por carro (1º da fila)

Conta-se o tamanho dos intervalos (Δ ti) que não consegue passar nenhum carro: desde (G1 - t02/2) segundos antes de cada carro até que passe o casro que antecede o GAP maior que G1.

$$TM = \frac{\sum \Delta ti^2}{2 \cdot (\text{intervalo total})}$$

i	INTERVALO	Δt_i	Δt_i^2
1	1 - 23	22	484
2	26 - 40	14	196
3	48 - 52	4	16
4	56 - 60	4	16
5	64 - 80	16	256
			968

$$T_m = \frac{968}{2 \times 80} = 6 \text{ segundos}$$

3. Interseções Semaforizadas

Neste caso, as filas são funções dos ciclos e tempos de verde adotados, e ainda do tipo de controlador utilizado. Não vamos aqui entrar em detalhes de como calcular os ciclos ótimos e as filas, pois trata-se de assunto extenso e já amplamente conhecido.

4. Travessia de Pedestres

Exatamente as mesmas fórmulas desenvolvidas para veículos se aplicam aos pedestres, sendo que a capacidade plena S2 é geralmente muito elevada, sendo quase sempre desprezível a fila aleatória.

Engº Pedro Szasz

Coordenação geral:
Engº Mauro Vincenzo Mazzamati (NET)