

SP 01/12/91

NT 138/91

## Necessidade de Sincronismo para Evitar Perda de Capacidade nas Interseções

Núcleo de Estudos de Tráfego (NET)

A fórmula tradicional que garante que dois semáforos próximos não sincronizados não interfiram um no outro é:

### Fórmula 1

$$T_{vmax} < \frac{L}{3}$$


onde  $T_{vmax}$  é o maior dos tempos de verde dos dois semáforos:

$$T_{vmax} = \max (TV1, TV2)$$

TV1 = fase de maior alimentação de 1 para 2

TV2 = verde de escoamento de 2

L = distância entre os semáforos

Esta condição é suficiente para garantir a não necessidade de coordenação, ou seja, a possibilidade dos semáforos terem ciclos independentes.

Entretanto, quando esta condição não acontece, não é obrigatório acontecer a interferência, pois:

- O volume que chega em 2 pode não ser suficiente para encher a caixa.
- O semáforo 2 pode abrir antes que a caixa encha.

A verificação exata da interferência exige cálculos ou fórmulas complicadas ou técnicas de simulação.

Eis algumas verificações mais simples:

- 1) Verificação do tempo de verde do semáforo atrás (supondo que o da frente não tenha problemas).

### A - Teste de volume máximo

Se o volume do semáforo atrás (1) que passa num ciclo, for inferior à caixa, não há interferências:

#### Fórmula 2

$$V1 \cdot TC1 < \text{caixa}$$

Se a rua for regular com n faixas

Fórmula 3

$$\text{Caixa} = \frac{n \cdot L}{do}$$

n = número de faixas  
do = distância entre carros parados

Fórmula 4

$$\text{Ou } V1 \cdot TC1 < \frac{n \cdot L}{do}$$

Fórmula 5

$$\text{E após transformações } TV1 < \frac{L}{So \cdot do \cdot x}$$

Onde:

$$x = \text{grau de saturação da aproximação} = \frac{TC1 \cdot V1}{n \cdot So \cdot TV1}$$

So = capacidade de 1 faixa

Adotando:

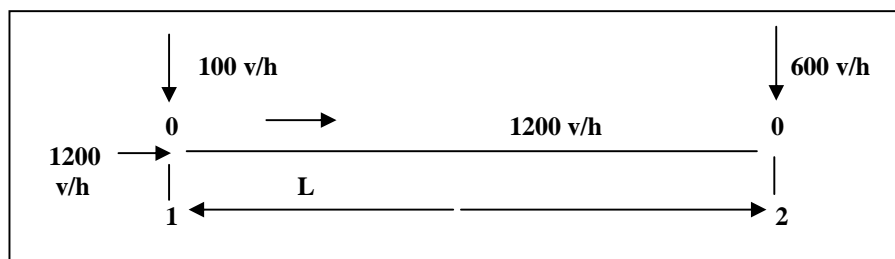
$$So = 0,5 \text{ veic./s e } do = 6\text{m}$$

Fórmula 6

$$TV1 < \frac{L}{3 \cdot x}$$

A equação (fórmula 6) não difere muito de (fórmula 1) de vez que x costuma ser próximo de 1 num semáforo bem dimensionado, exceto quando a fase não for a fase principal ou quando o volume da secundária for pequeno.

Exemplo:



Os ciclos ótimos após os cálculos são:

Semáforo	TC	TV	x
1	76	58	0,437
2	30	12	

Tvmin = 12s  
 TP = 6 s  
 n = 2 faixas  
 So = 0,5 veic./s

Se L for igual a 120 metros.

Pela expressão (fórmula 1):  $58 < \frac{120}{3} = 40$ , não é satisfeita

enquanto a (fórmula 6)  $58 < \frac{120}{3 \cdot 0,437} = 92$ , é satisfeita

Portanto, a sincronização não é indispensável.

#### Teste da fila máxima

Na condição mais desfavorável, se o ciclo da frente for sensivelmente menor que o atrás, e além disso, a capacidade do semáforo da frente for maior que o atrás, ou ainda, parte do fluxo não vier direto para o semáforo da frente, a fila máxima pode ser menor que o volume de um ciclo.

Definem-se: TC, TV, TR Tempos de ciclos, de verde e vermelho

#### Fórmula 7

$$TC = TV + TR$$

1= semáforo atrás

2= semáforo da frente

Vv = Volume que vai de 1 para 2 na fase verde

Vr = Volume que vai de 1 para 2 na fase vermelha

S2 = Capacidade de saída do semáforo 2 (média durante toda a fase verde)

Calcula-se a fila na pior condição, que é o semáforo da frente ficar em vermelho, quando chega o fluxo principal.

Definem-se:

NV = TC1 . Vv (fórmula 8) = carros por ciclo na fase verde de (1)

NR = TC1 . Vr (fórmula 9) = carros por ciclo na fase vermelha de (2)

Nv + NR = TC1 (Vv + Vr) = TC1 . V1 = carros por ciclo de 1 → 2

Calcula-se a fila que escoar ao fim do verde do cruzamento (1);

Fórmula 10

$$N_x = (TV1 - TR2) \cdot S2$$

Se  $N_x > NV$ , a fila  $N_m$  acaba antes do fim do verde do cruzamento (1), sendo dada por:

Fórmula 11

$$N_m = \frac{TR2}{\frac{TV}{N_v} - \frac{1}{S2}} \quad (\text{ver figura 1})$$

Se  $N_x < NV$ , a fila  $N_m$  acaba na fase vermelha do cruzamento (1), sendo dada por:

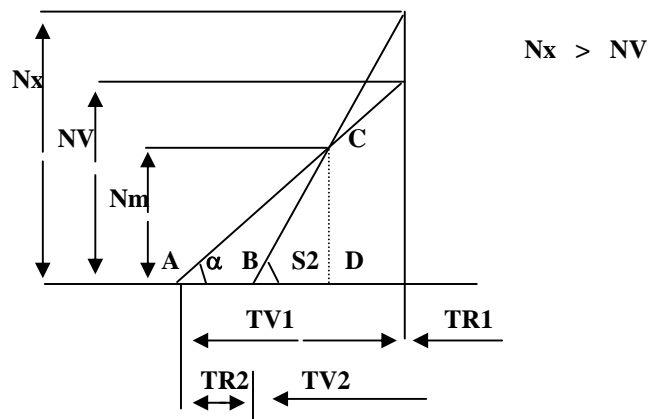
Fórmula 12

$$N_m = NV + \frac{(NV - N_x)}{\frac{S2 \cdot TR1}{NR}} - 1 \quad (\text{ver figura 2})$$

Calculado  $N_m$  verifica-se se ele excede a caixa máxima.

$$N_m < \frac{n \cdot L}{do}$$

Fórmula 13



$$\alpha = \frac{NV}{TV1} = \frac{N_m}{TR2 + BD}$$

$$BD = \frac{N_m}{S2}$$

$$N_m = \frac{TR2}{\frac{TV1}{NV} - \frac{1}{S2}}$$



$$1 - \frac{33}{36}$$

$$y_2 = \frac{1800 + 900}{3600} = \frac{27}{36}$$

$$TC_2 = \frac{11,5}{\frac{27}{1 - 36}} = 45$$

<i>TV1</i>	<i>TR1</i>	<i>TV2</i>	<i>TR2</i>
63	57	28	17

$$NV = \frac{1400}{3600} \cdot 120 = 46,7 \text{ veic./ciclo}$$

$$NR = 400 \cdot 120 = 13,3 \text{ veic./ciclo}$$

$$N_t = NV + NR = 60 \text{ veic./ciclo}$$

Condição simples  $TV_1 < \frac{L}{3}$  dá:

$$L > 189\text{m (expressão fórmula 1)}$$

Já a expressão (fórmula 6) indica:  $N_t < \text{caixa}$

Onde:  $\text{caixa} = \frac{n}{\text{do}} \cdot \frac{L}{6} = \frac{2}{6} \cdot L = \frac{L}{3}$

logo,  $L > 60 \cdot 3 = 180\text{m}$

Já o cálculo detalhado indica:

$$N_x = (TV_1 - TR_2) S_2$$

$$N_x = (63 - 17) \cdot 1 = 46$$

Como  $N_x < NV$ , obtém-se:  $N_m = NV + \frac{(NV - N_x)}{\frac{S_2 \cdot TR_1}{NR} - 1}$

$$N_m = 46,7 + \frac{(46,7 - 46)}{1 \cdot \frac{57}{13,3} - 1} = 46,7 + 0,2 = 46,9$$

$$Nm < \text{caixa} \Rightarrow \frac{L}{3} > 46,9$$

Logo,  $L > 140\text{m}$

## 2) Verificação do semáforo da frente ( de trás tem verde menor)

Aqui o cálculo é mais simples, pois só ocorre perda de capacidade quando a caixa entre os semáforos se esgota na fase verde, e não há alimentação suficiente para mantê-la.

A caixa de plena carga é calculada por:

$$NF = \frac{L \cdot n}{do} + [ L \cdot \left( \frac{1}{vd} - \frac{1}{vl} \right) - tc ] \cdot \frac{0c \cdot S2}{S2 - 0c}$$

onde,

L = distância entre os semáforos

n = número de faixas

do = distância entre dois carros

vd = velocidade média dos carros na descarga

vl = velocidade média dos carros

tc = tempo perdido na saída dos semáforos, pelo fluxo vermelho

0c = fluxo/hora da conversão do vermelho

S2 = fluxo de saturação do semáforo 2

### Fórmula 14

$$0c = \frac{NR}{TR1}$$

Se a expressão entre colchetes for negativa considerar só primeiro termo.

O segundo termo representa o ganho de capacidade, pela maior velocidade que os veículos livres desenvolvem, em relação aos veículos do fim da fila.

Usualmente  $vd = 25 \text{ Km/hora}$  e  $vl = 45 \text{ Km/hora}$ ,  $tc = 3\text{s}$ ,  $do = 6\text{m}$ , resultando em:

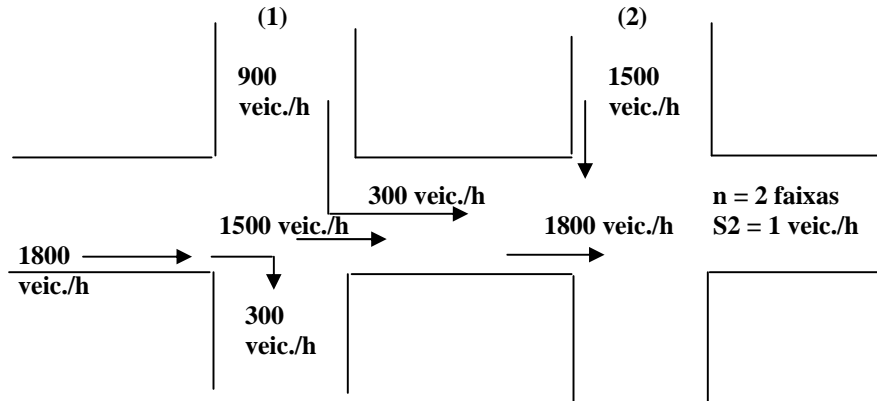
### Fórmula 15

$$NF = \frac{L \cdot n}{6} + \left( \frac{8L}{125} - 3 \right) \cdot \frac{1}{\left( \frac{TR1}{NR} - \frac{1}{S2} \right)}$$

### Fórmula 16

Se  $NF < Nt$  (fórmula 16) não há prejuízo da capacidade.

Exemplo:



	TC	TV	TR	NV	NR
1	45	28	17	18,75	3,75
2	120	63	57		

$$N_t = 1800 \cdot \frac{120}{3600} = 60$$

No cálculo simples a distância limite seria:  $L_1 = 63 \cdot 3 = 189$

Pelo critério dos carros que passam (caixa máxima), a distância limite vale:

$$L_1 = \frac{N_t \cdot d_o}{n} = \frac{60 \cdot 6}{2} = 180$$

e pela equação (fórmula 15), obtém:

$$60 = \frac{L}{3} + \left( \frac{8L}{125} - 3 \right) \cdot \frac{1}{\frac{17}{3,75} - 1}$$

$$60 = 0,35 L - 0,85 \text{ ou } L = 174\text{m}$$

No exemplo a diferença foi desprezível pois a conversão é pequena.



Nota Suplementar

Nos casos em que, pelo critério de distância mínima, resultar necessária a sincronização, uma terceira alternativa que também deve ser analisada é a redução do ciclo, apenas o suficiente para evitar a necessidade de sincronização.

Para tanto, sendo:

D = distância real

D1 (Tcot) = distância mínima exigida pelo ciclo Tcot

Fórmula 17

Pode-se estimar  $Tc_{ind} = Tcot \cdot \frac{D}{D1(Tcot)}$

E com este ciclo (recalcular os atrasos isolados, e seguir a partir daí o processo normalmente).  
É evidente que se o ciclo maior tiver baixado muito, e portanto, o atraso já estiver grande, será mais fácil obter vantagens na sincronização.

-----  
Eng.º Pedro Szazs  
Núcleo de Estudos de Tráfego (NET)