

SP 01/07/92

NT 152/92

## Soluções Alternativas ao Semáforo: Aspectos Teóricos

### Núcleo de Estudos de Tráfego

#### 1. Introdução

A implantação de semáforo implica em custos elevados de implantação e operação, além de causar geralmente um aumento no atraso dos veículos, cujo custo anual é imenso. Todos os Manuais citam sempre soluções alternativas, que podem ser melhores e menos custosas. Passaremos a analisar algumas.

#### 2. Sinalização de Advertência

Quando a placa “PARE” não é respeitada, pode-se reforçá-la com o “PISCANTE”, mais a placa “CRUZE COM CUIDADO”, ou com sinalização de solo dizendo “PARE”, “DEVAGAR”, “CUIDADO”, etc.

Estudos teóricos indicam que, mesmo após criteriosos estudos, se escolhêssemos em toda a cidade quais os locais com “PARE” que devemos colocar o reforço de sinalização, os índices de acidentes devido a estes reforços não deveriam reduzir mais do que 5%.

Este baixo resultado advém do fato de os usuários estarem dispostos a correr certo risco para ganhar tempo. A sinalização coerente pode dar uma idéia melhor do risco que o motorista está correndo, mas seu efeito global na redução de acidentes é pequeno.

A superabundância de placas e advertências tende a fazer o efeito ainda menor, pois hoje em dia, em praticamente todas as ruas em que se anda em São Paulo há placas indicando a velocidade máxima, cuidado com os pedestres, crianças, escolas, cruze com cuidado, aguarde o verde, obedeça à sinalização, enfim, placas que acabam se tornando como que invisíveis.

#### 3. Mini-rotatória

A aplicação de minirotatória tem as seguintes vantagens (aplicação SP)

##### 3.1 Vantagens

##### 3.1.1 Redução da velocidade

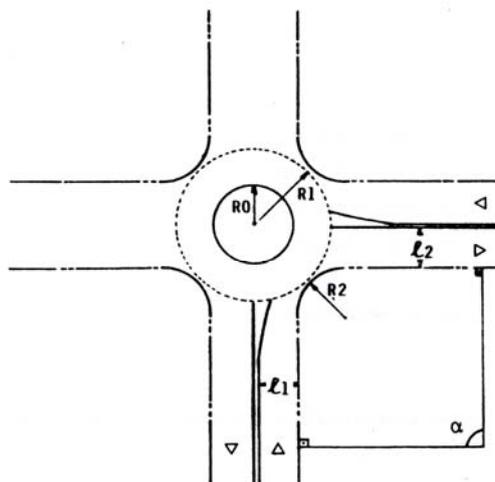
Quer interpretando a minirotatória como obstáculo (fileira e tachões) quer como ilha a ser contornada, a rotatória causa redução de velocidade. A maioria dos veículos contorna a rotatória e sua velocidade é função da aceleração lateral máxima “suportada” pelo motorista, dada por:

$$a = \frac{v^2}{r}$$

Admitindo  $a = 4\text{m/s}^2$ , obtém-se as seguintes velocidades em função de  $r$ .

$r$ (m)	$v$ (Km/h)
5	16
10	22
15	28
20	32
30	34
40	46
50	51
60	56

O raio da curvatura das trajetórias, por sua vez, é função da geometria do local e do itinerário particular do motorista. Para vias regulares:



**sendo:**

$R_0$  = raio da minirotatória

$R_1$  = raio do círculo tangente às esquinas.

$R_2$  = raio da esquina

$L_1$  = largura da via (meia pista se mão dupla de entrada)

$L_2$  = largura da via de saída (meia pista se mão dupla)

$\alpha$  = ângulo entre as vias

$x$  = largura do veículo

O raio máximo vale:

a) Conversões à direita: o raio da curvatura é independente e vale:

$$R_d \approx R_2 + \frac{l_1 + l_2 + 2x}{2(1 - \cos \frac{a}{2})}$$

b) Movimentos em frente:

$$R_f \approx \frac{(R_2 + l_2)^2}{4(R_0 + x - l_1)}$$

Para  $(R_0 + x) \leq l_1$  tem-se

$R_f \rightarrow \infty$  e não há redução de velocidade.

Pela equação acima, podemos obter  $R_0$  indicado para um certo efeito de redução de velocidade.

$$R_0 = l_1 - x + \frac{(R_2 + l_2)^2}{4 R_f}$$

onde  $R_f$  é obtido da tabela de raios e velocidades.

De forma geral, este dimensionamento conduz a raios bem maiores que a fórmula usual  $R_0 = 0,4 R_1$ , a qual visa mais a um aumento de capacidade que redução de velocidade.

c) Conversão à esquerda

$$R_e \approx \frac{R_0 + R_1}{2}$$

### 3.1.2. Advertência

A minirrotatória em si é um sinal físico que adverte aos veículos de todas as aproximações a existência de um cruzamento.

### 3.1.3. Visibilidade

Ao se posicionarem para passar pela rotatória, os veículos se colocam nas melhores condições de visibilidade (no canto direito da via), o que reduz a possibilidade de acidentes. Geralmente, a proibição de estacionamento é respeitada junto à esquina, o que também melhora a visibilidade.

### 3.1.4. Refúgio

Em vias e grande movimento nos dois sentidos, a rotatória serve como um divisor de fluxo, que permite aos veículos da secundária cruzar cada um dos sentidos de uma vez. Isto aumenta a capacidade e a segurança da via e reduz o tempo médio da travessia. Grosso modo, a minirrotatória permite operar sem semáforo até cerca do dobro do volume (na principal), que com um PARE convencional (sem refúgio).

## 3.2 Desvantagens

As desvantagens da minirrotatória são: veículos pesados, pedestres e capacidade.

### 3.2.1 Veículos pesados

Normalmente têm dificuldades de fazer o giro, costumado a passar sobre a rotatória. Se a porcentagem desses veículos for elevada, a rotatória perde parte da sua eficiência como dispositivo de segurança.

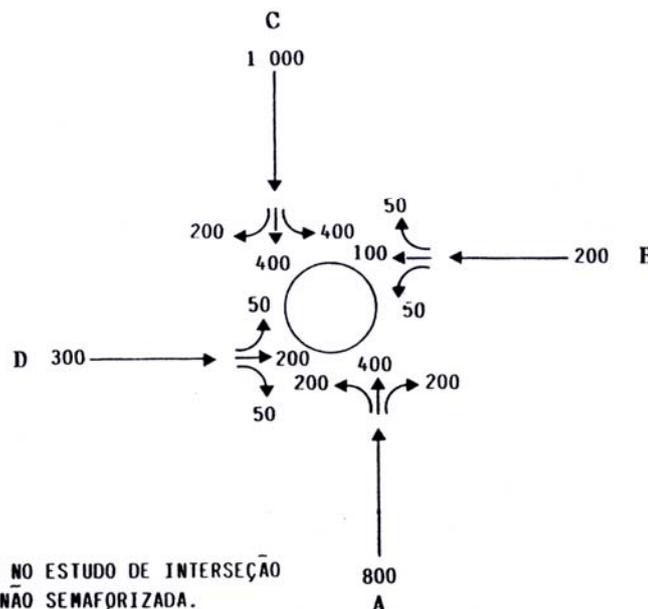
### 3.2.2. Pedestres

- a) Como os veículos não têm parada obrigatória e determinada como nos semáforos, fica mais difícil ao pedestre atravessar
- b) Nas minirrotatórias, os veículos circulam junto às calçadas, tornando a área de perigo maior para os pedestres.
- d) Nos cruzamentos convencionais, é mais fácil aos pedestres, pelo comportamento (velocidade e direção) dos veículos, prever se ele vai em frente, virar à esquerda ou à direita, e, portanto, decidir se há ou não um GAP para travessia. Em minirrotatórias, como os comportamentos são mais parecidos, esta previsão é mais difícil.
- e) A ilha central e as pequenas ilhas de tachões, separadoras de fluxo, embora pudessem servir de refúgio aos pedestres, não lhes dão segurança na travessia, pois sempre há algum veículo que efetua a travessia de forma irregular, invadindo estes espaços.

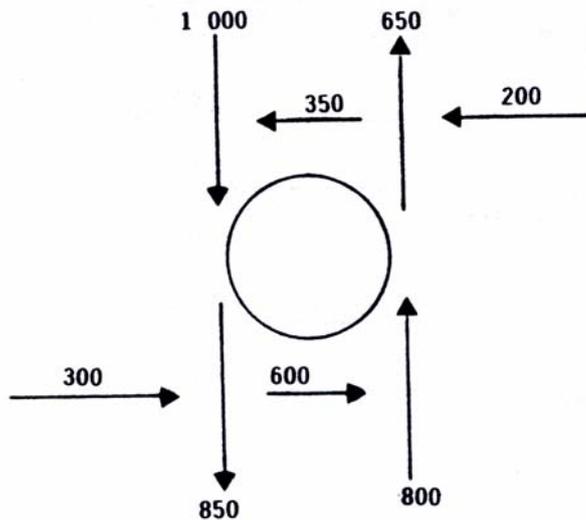
### 3.2.3. Capacidade

Em São Paulo, não se logrou (aliás, nenhum esforço foi feito) que os veículos circulando tivessem prioridade sobre os que se aproximam. Vale a lei da via preferencial, onde os veículos da via principal circulam sem parar e os demais que se cuidem. Neste esquema, a capacidade deve ser determinada em cada chegada pelas fórmulas usuais desenvolvidas na NT 151 (*Aspecto e Fluidez no Estudo de Interseção SemafORIZADA e não SemafORIZADA*), para interseções sem semáforo.

Exemplo.



No caso acima, supondo que A e C sejam preferenciais, os volumes dos “4” cruzamentos seriam:



Em cada cruzamento, a capacidade para a transversal é dada por:

$$S2(g) = S2o (1 - y1) e^{-V1 Gl \left[ \frac{1}{2 S2o} + y1 \right]}$$

$G l$  = GAP de aceitação

$$y1 = \frac{V1 + \text{volume da via principal}}{S1 \text{ capacidade da via principal}}$$

$S2o$  = capacidade da transversal

Na falta de melhores informações, pode-se usar para minirrotatória:

$S2o$  = 1400 veic./hora (se houver só 1 faixa)

$G l$  = 4,5 s

$S1$  = 1600 veic./hora

No exemplo, no “cruzamento” mais carregado, obtemos:

$V2$  = 600 veic./hora

$V1$  = 800 veic. / hora

$$S2 = 1400 \cdot \left[ 1 - \frac{800}{1600} \right] e^{-\frac{800}{3600} \left[ 4,5 - \frac{3.600}{2 \cdot 1400} \right] + \frac{800}{1600}}$$

$$-0,214 = 565 \quad S2 = 1400 \cdot 0,5 \cdot e$$

donde

$$X2 = \frac{V2}{S2} = \frac{600}{565} = 1,06$$

Portanto, pelo exemplo, este “cruzamento” está acima de sua capacidade, e a minirrotatória não é uma boa solução.

O desempenho de uma minirrotatória é considerado satisfatório se:

- a) o maior dos graus de saturação for menor que 0,9;
- b) para dois “cruzamentos” na mesma seqüência tenhamos  $X1 \cdot X2 < 0,7$

Se os graus de saturação forem maiores, além dos atrasos elevados, ocorrem situações de travamento que deixam a rotatória definitivamente congestionada.

Em condições normais, uma minirrotatória pode suportar os seguintes fluxos ( $X = 0,9$ ).

<b>MAIOR FLUXO DA PRINCIPAL</b>	<b>MAIOR FLUXO DA TRANSVERSAL (+ CONVERSÃO)</b>
<b>600</b>	<b>670</b>
<b>800</b>	<b>510</b>
<b>1 000</b>	<b>360</b>
<b>1 200</b>	<b>230</b>
<b>1 400</b>	<b>110</b>

#### 4. Lombadas

Quando os problemas de acidentes puderem ser resolvidos ou bem diminuídos simplesmente pela redução de velocidade, o obstáculo ou lombada pode se constituir numa solução eficaz.

Exemplos de aplicação típica:

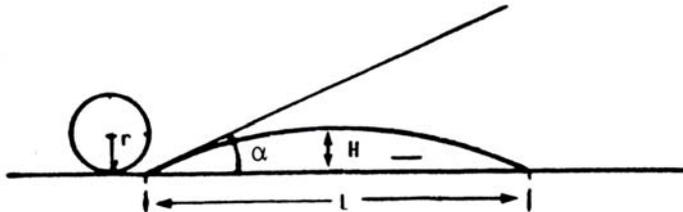
1. Atropelamentos em geral.
2. Colisões em semáforos ou cruzamentos
3. Tombamentos e capotamentos

Praticamente todos os tipos de acidentes têm sua freqüência e gravidade diminuída quando a velocidade diminui.

## 4.1. Perfil de lombada e velocidade

Para lombadas de mais de 1,5 metros de largura, o impacto no veículo é função quase linear do ângulo de início da lombada.

Admitindo perfil parabólico, sendo **L** a largura, **H** sua altura e **r** o raio do pneu, este ângulo ( $\alpha$ ) é dado por:



$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{4H}{\sqrt{L^2 + 8 H r}}$$

Ex: Lombada tipo II

H 0,1 m

L 3,7 m

R 0,3 m

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{4 \cdot 0,1}{\sqrt{3,7^2 + 8 \cdot 0,1 \cdot 0,3}} = 0,107$$

A velocidade média dos veículos sobre a lombada é inversamente proporcional a tg do ângulo

$$v = \frac{2}{\operatorname{Tg} \alpha} \quad (v \text{ em km/h})$$

ou com boa aproximação

$$v \approx \frac{L}{2 \cdot H}$$

Assim na lombada tipo II, com  $H = 0,1$  e  $L = 3,7$  obtém-se

$$v \approx 18 \text{ km/h}$$

Conforme a velocidade desejada, acerta-se o perfil.

Nota

Caso o terreno onde se assenta a lombada seja muito irregular, o ângulo real de “ataque” pode ser muito diferente para lombadas teoricamente iguais, dando origem a velocidades também diferentes.

#### 4.2. Tempo perdido

Para carros médios, o tempo perdido na desaceleração e aceleração é expresso pela fórmula:

$$\Delta t = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3$$

onde

$\Delta t_1$  = tempo perdido na frenagem

$\Delta t_2$  = tempo perdido passando o obstáculo

$\Delta t_3$  = Tempo perdido na retomada da velocidade

$$\Delta t_1 = \frac{V_1 - V_2}{2f} \quad \Delta t_2 = \left[ \frac{L + X}{v_2} \right] \left[ \frac{1}{v_1} - \frac{1}{v_2} \right]$$

$$\Delta t_3 = \frac{M}{6 \cdot P \cdot Re} \left[ V_1 - V_2 \right] \left[ V_1 + V_2 - 2 \cdot \frac{V_2^2}{V_1} \right] \quad V_1$$

onde

$V_1$  = velocidade inicial (igual e final)

$V_2$  = velocidade do obstáculo

$M$  = massa do veículo

$P$  = potência do veículo

$Re$  = rendimento prático

$f$  = desaceleração na frenagem

$L$  = tamanho do obstáculo

$X$  = tamanho do veículo

As equações acima são adimensionais.

**usando:**

$V$  = Km/hora

$F$  = m / s<sup>2</sup>

$M$  = Kg

$P$  = Cavalos

$L$  = Metros

$X$  = metros

$$\Delta t_1 = \frac{V_1 - V_2}{7,2 f} \quad \Delta t_2 = 3,6 \left[ \frac{L + X}{v_2} \right] \left[ \frac{1}{v_1} - \frac{1}{v_2} \right]$$

$$\Delta t_3 = \frac{M \left[ V_1 - V_2 \right] \left[ V_1 + V_2 - 2 \cdot \frac{V_2^2}{V_1} \right]}{P \cdot Re}$$

Para  $f = 3$   
 $M = 1000$   
 $L + X = 8$   
 $Re = 0,33$   
 $P = 70$

As equações se tornam

$$\Delta t1 = \frac{V1 - V2}{21,6} \qquad \Delta t2 = 28,8 \left[ \frac{1}{v1} - \frac{1}{v2} \right]$$

$$\Delta t3 = \left[ V1 - V2 \right] \left[ V1 + V2 - 2 \cdot \frac{V2^2}{V1} \right]$$

1330

Ex:  $V2 = 18 \text{ km/h}$  (lombada tipo II)

V1	$\Delta t1$	$\Delta t2$	$\Delta t3$	$\Delta t$
40	1,0	0,9	0,7	2,6
60	1,9	1,1	2,1	5,1
80	2,9	1,2	4,4	8,5

Como se vê, é muito cálculo para pouco tempo perdido. A tabela acima dá uma idéia do que cada veículo perde ao passar num obstáculo.

#### 4.3. Capacidade

A capacidade é função da velocidade sobre a lombada (por sua vez função do ângulo de ataque). Experiências práticas forneceram uma capacidade de 1.400 veículos por hora por faixa, para lombada tipo II.

Admitindo como 18 km/h a velocidade sobre a lombada tipo II, sugere-se, para outros perfis de lombada, uma capacidade conforme a equação abaixo:

$$S = n \cdot 3370 \left[ \frac{v}{21,6 + v + \frac{v^2}{86,4}} \right]$$

v = velocidade no obstáculo em km/h

n = número de faixas

#### 4.4. Espaçamento entre lombadas

A retomada da velocidade é função da distância entre lombadas. A tabela abaixo indica quais as velocidades máxima e média, no trecho entre obstáculos para lombadas do tipo II.

ESPAÇAMENTO	VELOCIDADES ESPERADAS (KM/h)		
	MÍNIMA	MÁXIMA	MÉDIA
10	18	18	18
50	18	39	32
100	18	52	37
150	18	61	42
200	18	69	46
300	18	80	53
400	18	90	59
500	18	98	65

(A velocidade máxima ocorre se for inferior à velocidade usual sem lombada).

Isto significa dizer que para que a velocidade máxima de uma via não passe de 80 km/h, basta colocar uma lombada a cada 300 metros ao longo de toda a via.

---

Pedro Szasz (NET)

Coordenação geral:  
Engº Mauro Vincenzo Mazzamati (NET)